N° D'ORDRE : 792

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

Monique ANGENIEUX née LAFFITTE

1re THÈSE — « **Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales.** »

2e THÈSE — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 29 mars 1963 devant la Commission d'examen.

MM. A. ARNULF *Président.*
M. FRANÇON, A. MARÉCHAL } *Examinateurs.*

Extrait de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*
3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres
PARIS (15e)
1964

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538112_0045

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Nom du Candidat : **ANGENIEUX**

Prénom : **Monique**

Date de la soutenance : 29 mars 1963

Numéro d'ordre : N° 792

1

ANGENIEUX (Monique). — Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1964.

Th. Doct. Ing. Paris, 1963, N° 792.

2

ANGENIEUX (Monique) — Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1964.

Th. Doct. Ing. Paris, 1963, N° 792.

3

ANGENIEUX (Monique). — Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1964.

Th. Doct. Ing. Paris, 1963, N° 792.

4

ANGENIEUX (Monique). — Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1964.

Th. Doct. Ing. Paris, 1963, N° 792.

N° D'ORDRE : 792

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

Monique ANGENIEUX née LAFFITTE

1re THÈSE — « **Amélioration des clichés photographiques par la méthode du filtrage des fréquences spatiales.** »

2e THÈSE — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 29 mars 1963 devant la Commission d'examen.

MM. A. ARNULF *Président.*
M. FRANÇON
A. MARÉCHAL } *Examinateurs.*

Extrait de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*
3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres
PARIS (15e)
1964

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen..... M. ZAMANSKY.

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.
GRASSÉ	T	Evolution des êtres organisés.
PRÉVOST	T	Chimie organique.
WYART	T	Minéralogie et Cristallogr.
TEISSIER	T	Zoologie.
MANGENOT	T	Biologie Vég. (Orsay).
AUGER	T	Physique quantique et Relativité.
MONNIER	T	Physiologie Générale.
PIVETEAU	T	Paléontologie.
ROCARD	T	Physique (E. N. S.).
CARTAN	T	Mathématiques (E. N. S.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.
FAVARD.....	T	Géométrie supérieure.
COULOMB	T	Physique du Globe.
Mlle COUSIN	T	Biologie Anim. (S.P.C.N.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.
DRACH	T	Zoologie.
KASTLER	T	Physique (E. N. S.).
EPHRUSSI	T	Génétique.
RIVIÈRE	T	Géologie (S. P. C. N.) et sédim.
GAUTHERET	T	Biologie Vég. (P. C. B.).
LUCAS R.	T	Recherches Physiques.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.
ARNULF	T	Optique appliquée.
MORAND	T	Physique Enseignement.
SOLEILLET	T	Physique (P. C. B.).
FORTIER	T	Mécanique exp. des Fluides.
DANJON	T	Astronomie.
PETIT	T	Biologie maritime.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
GALLIEN	T	Embryologie.
EICHHORN.....	T	Botanique.
DE CUGNAC	T	Biologie Vég. (S.P.C.N.).
Mlle CAUCHOIS	T	Chimie Physique.
THELLIER	T	Physique du Globe.
L'HÉRITIER	T	Biologie Générale (Orsay).
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay).
PONCIN	T	Mécanique Générale.
DUBREIL	T	Arithmétique et Théorie des Nombres.
QUELET	T	Chimie Organique.
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.
JUNG	T	Pétrographie.
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.
WIEMANN	T	Chimie organique et structurale.
JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste (Orsay).
VASSY	T	Physique de l'atmosphère.
DESTOUCHES	T	Théories Physiques.
AMIEL	T	Chimie générale.
HOCART	T	Minéralogie et Cristallogr.
J. P. MATHIEU	T	Physique (Optique).
COUTEAUX	T	Cytologie.
MAY	T	Zoologie (Orsay).
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.
FELDMANN	T	Biologie Végétale marine.
GUINIER	T	Physique des Solides (Orsay).
JOST	T	Physiologie comparée.
FORTET	T	Calcul des Probabilités et Phys. mathematique.
SCHWARTZ	T	Calcul diff. et Intégral.
CHOUARD	T	Physiologie Végétale.
MALAVARD	T	Aviation (Techn. Aéronaut.).
BRELOT	T	Calcul diff. et Intégral.
NORMANT	T	Chimie organique.
BÉNARD	T	Chimie Minérale.
BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
DUGUÉ	T	Statistiques Mathématiques.
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
ULRICH	T	Physiologie Végétale.
MARÉCHAL	T	Optique théorique et appliquée.
KIRRMANN	T	Théories Chimiques.
CHADEFAUD	T	Botanique.
Mlle LE BRETON	T	Physiologie de la nutrit.
LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie.
DEVILLERS	T	Anatomie et Histologie comparées.
EHRESMANN	T	Topologie Algébrique.
FRANÇON	T	Physique (S. P. C. N.).
GLANGEAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique.
GODEMENT	T	Mathématiques (M.P.C.)
PISOT.....	T	Tech. Mathém. de la Phys.
ROCH	T	Géologie.
SCHATZMAN	T	Astrophysique.
TERMIER	T	Paléontologie stratigr.
ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
LENNUIER.....	T	Physique (M. G. P.).
RIZET	T	Génétique.
ROUTHIER.....	T	Géologie appliquée.
Mme TONNELAT	T	Physique Théorique.
DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).
SOUCHAY.....	T	Chimie générale.
AIGRAIN	T	Electrotechnique générale.
BRUSSET	T	Chimie systématique.
M. LÉVY	T	Physique théorique des Hautes Energies (Orsay).
Mme CHAIX	T	Chimie biologique.
Mme HUREL-PY	T	Biologie Végétale (P.C.B.).
PIAUX	T	Chimie (M. P. C.).
BRUN	T	Mécanique théorique des Fluides.
LEDERER	T	Chimie biologique.
Mme DUBREIL	T	Mathém. (Agrégation).
Mme LELONG	T	Mathém. II (E.N.S.).
BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.).
COTTE	T	Physique électricité.
DUBOIS J. E.	T	Chimie organique.
LAMOTTE.....	T	Zoologie (E. N. S.).
MICHEL A.	T	Chimie Minérale (Orsay).
OLMER.....	T	Energétique générale.
ROUAULT	T	Electricité (Orsay).
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
BARCHEWITZ.....	T	Chimie Physique.
BROSSEL	T	Physique atomique.
BUSER	T	Physiologie comparée.
CAMUS	T	Physiol. Vég. (B.M.P.V.).
CASTAING	T	Physique II Thermod. (Orsay).
CURIEN	T	Minéralogie et Cristallographie.
MOYSE	T	Physiologie végétale (Orsay).
NOIROT	T	Evolution des Etres Org.
PANNETIER	T	Chimie générale.

(suite au dernier page)

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN

AMÉLIORATION DES CLICHÉS PHOTOGRAPHIQUES PAR LA MÉTHODE DU FILTRAGE DES FRÉQUENCES SPATIALES

par Mme Monique ANGÉNIEUX-LAFFITTE

SOMMAIRE. — *On a déterminé l'importance des différents éléments du restituteur permettant l'amélioration de clichés photographiques par le filtrage des fréquences spatiales. Ceci a conduit en particulier à étudier le comportement des émulsions lors du filtrage : déphasages introduits, conditions de linéarité. On a effectué un cliché pris avec un défaut de mise au point. Le filtre correcteur comprenant un anneau déphasant et un centre absorbant a été calculé, réalisé et mesuré. On a déterminé le filtre donnant la meilleure restitution d'un texte et de séries de traits.*

SUMMARY. — *The importance of the different components of the restitution apparatus improving the quality of photographic pictures by filtering spatial frequencies has been determined. This approach has led in particular to study the behavior of the emulsions in conjonction with the experimental set up, i. e. : 1) the phase shifts it introduces and 2) the conditions of linearity. An out of focus picture has been taken. The filter correcting this default (consisting of a dephasing ring and a absorbing center) has been constructed well in agreement with the theoretic design and its characteristics have been measured. The experimental optimum filter giving the best restitution of a text and series of lines has been determined.*

1. **Introduction.** — *1. But.* — Nous présentons ici le résultat de nos recherches dont le but était d'étudier l'amélioration d'images de qualité insuffisante enregistrées sur une émulsion photographique.

La méthode utilisée est celle du filtrage des fréquences spatiales du cliché à améliorer. L'atténuation ou même la suppression de certaines fréquences, le déphasage de certaines fréquences d'amplitudes négatives (inversion de contraste) permettent d'obtenir diverses améliorations.

2. Travaux antérieurs. — Des travaux ont déjà été effectués à l'Institut d'Optique de Paris qui ont porté sur l'augmentation du contraste faible des fins détails d'une image à l'aide d'un filtre absorbant les basses fréquences (travaux de Mrs A. Maréchal, Croce, Dietzel [4 à 6]), la suppression de la structure périodique de la trame de clichés tramés en absorbant le spectre de la trame (travaux de Mme Marquet [7]), la lisibilité d'un texte brouillé par un défaut de mise au point en atténuant les fréquences les mieux transmises pour obtenir une courbe de transmission des fréquences spatiales aussi plate que possible (travaux de Tsiu-jiuchi [8]).

3. Recherches effectuées. — Notre travail a constitué à poursuivre ces essais d'amélioration pour obtenir les résultats les plus satisfaisants possible. L'amélioration étant très souvent aléatoire, nous avons été amenée à étudier l'influence des différents éléments de la chaîne de filtrage et déterminer les conditions à satisfaire pour obtenir les meilleurs résultats. Nous avons ainsi été conduite à étudier tout

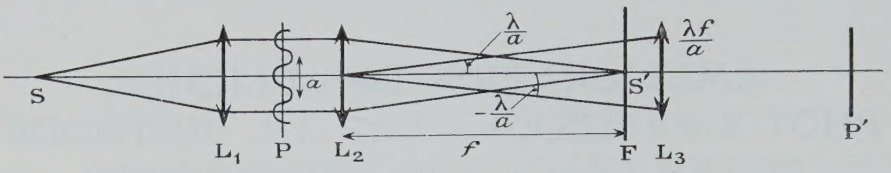


FIG. 1. — S, source ponctuelle (éclairage cohérent) ; lumière parallèle entre L_1 et L_2.

particulièrement le comportement des émulsions dans le restituteur, lors du filtrage, leurs défauts de phase et leurs conditions de linéarité.

Enfin nous nous sommes intéressée au cas particulier d'un cliché photographique pris avec un défaut de mise au point. Le filtre correcteur a été calculé et réalisé. Sa loi en densité a été mesurée au microphotomètre et nous avons recherché le filtre donnant le meilleur débrouillage.

Le cas du cliché avec défaut de mise au point à restituer nous a particulièrement intéressée car c'est le cas le plus complexe où le filtre compensateur comprend un centre absorbant avec une loi en densité bien déterminée et un anneau déphasant de π.

2. **Rappel de quelques notions fondamentales.** — *1. Analyse harmonique d'une image.* — Le montage schématisé sur la figure 1 met en évidence les fréquences spatiales d'une image et permet de modifier leurs amplitudes.

Il comprend :

une source S ponctuelle monochromatique (éclairage cohérent) au foyer d'un collimateur L_1, parfaitement corrigé ;

l'objet à étudier P, transparent, éclairé en lumière parallèle ;

un objectif L_2 parfaitement corrigé qui donne une image S′ de S en son foyer dans le plan F ;

une lentille L_3 qui donne une image P′ de P.

En effet, dans le plan F de l'image de la source S, la répartition des amplitudes est la transformée de Fourier de la répartition des amplitudes de l'objet P (application du principe de Huygens-Fresnel [1]).

L'objet P pourra être décomposé en un ensemble de deux signaux symétriques ; à chaque fréquence spatiale ν de P correspondront dans le plan F deux signaux symétriques dans les directions $\pm \lambda/a$ à une distance $\lambda f/a$ de l'image S′ de la source.

Si, par exemple, l'objet est un réseau sinusoïdal de période a, on aura dans le plan F deux signaux symétriques dans les directions $\pm \lambda/a$.

Remarque. — Seules les fréquences inférieures à la fréquence de coupure de l'objectif L_3 seront transmises avec un facteur de transmission égal à 1 (éclairage cohérent, objectif supposé parfait) [1].

2. Filtrage des fréquences spatiales. — On voit donc qu'avec un tel dispositif on peut aisément supprimer ou atténuer certaines fréquences spatiales de l'objet P en plaçant dans le plan F un diaphragme ou un filtre absorbant. En particulier si l'objet P est un cliché photographique transparent, on peut augmenter la lisibilité, le contraste, atténuer le grain à l'aide d'un filtre placé dans le plan F et ainsi amé-

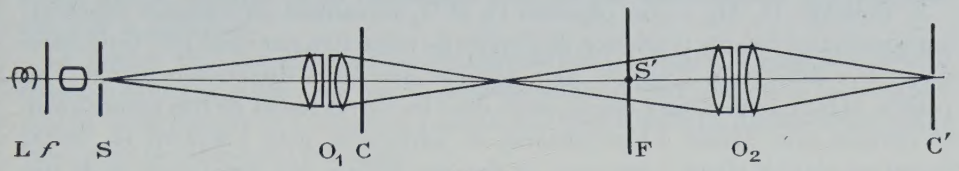


FIG. 2.

liorer la qualité de l'image, ce qui est particulièrement recherché pour les photographies aériennes, radioscopiques, etc.

3. **Montage du restituteur pour l'amélioration des clichés photographiques. Importance des différents éléments.** — Les diverses améliorations ont été effectuées sur le restituteur de Maréchal et Croce. Il comprend (fig. 2) :

une lampe L à vapeur de mercure ;

un condenseur qui donne une image de la lampe sur le trou-source S ;

un filtre f qui ne laisse passer que la raie verte du mercure ;

un objectif O_1, très bien corrigé (deux doublets du type Clairaut) de longueur focale 300 mm, donnant une image S′ de S dans le plan F où sera disposé le filtre ;

un objectif O_2, très bien corrigé (également deux doublets), qui donne une image C′ restituée du cliché C à améliorer placé contre O_1 pour être pratiquement dans la pupille de celui-ci.

Au moyen d'un viseur on règle le centrage du filtre sur l'image S′ de la source S dans le plan F. On peut observer visuellement, à l'aide d'une loupe, le cliché restitué qui se projette sur un verre dépoli ou enregistrer photographiquement en plaçant une émulsion dans le plan C′.

Les premiers essais de restitution que nous avons effectués nous ont conduite à faire une étude approfondie de chaque élément de la chaîne du restituteur.

En effet, la restitution du cliché flou pris avec un défaut de mise au point de la figure 3 (planche I) est satisfaisante ; par contre, elle l'est moins sur la figure 4 (planche II) où le bruit de fond est augmenté après le filtrage et noie l'information.

Les résultats étant aléatoires nous avons étudié les différents éléments du restituteur afin de déterminer les meilleures conditions à réaliser pour obtenir un filtrage optimum.

1. Source. — Le diamètre du trou-source doit être choisi de telle façon que le flux lumineux soit assez grand et que la lumière reste cohérente ; on a pris un rapport du diamètre du trou-source à la distance source-objectif inférieur à 10^{-3}.

L'augmentation du contraste et la compensation des défauts sont réalisés en absorbant les basses fréquences ce qui perd beaucoup de lumière. S'il faut qu'il en reste suffisamment pour pouvoir enregistrer la restitution en C′, il en faut encore davantage pour l'observer. Aussi le diamètre du trou-source est-il choisi tel que son image S′ soit environ le cinquième du diamètre du centre absorbant dans le cas de la restitution du défaut de mise au point.

On a recherché une lampe de très grande puissance (HB 200 par exemple).

La source doit être aussi très monochromatique puisque l'analyse des fréquences spatiales dans le plan F est fonction de la longueur d'onde. La bande passante du filtre doit être suffisamment étroite.

2. *Objectifs* O_1, O_2. — Les objectifs O_1 et O_2 travaillant en éclairage cohérent, leurs moindres défauts (variation de l'indice de réfraction par exemple) vont introduire une diffraction d'autant plus gênante que leurs dimensions seront plus petites. Il faut donc utiliser des objectifs dont les verres soient de très bonne qualité optique sans défaut d'homogénéité, en particulier pour l'objectif O_1 contre lequel est placé le cliché à restituer ; sa dernière surface doit être propre et de très bonne qualité car son image se forme aussi dans le plan du cliché C′ amélioré.

On constate en effet sur les clichés restitués des figures 3 et 4 les défauts d'homogénéité de l'objectif O_1.

3. *Cliché à améliorer* C. — Comme les objectifs, l'émulsion sur laquelle est enregistré le cliché à améliorer doit être de très bonne qualité optique pour ne pas introduire de déphasages notables. Une simple observation des émulsions en éclairage incohérent est insuffisante. L'examen des clichés restitués des figures 3 et 4 montre la très grande importance du choix de l'émulsion. Si le débrouillage est aussi réalisé dans le cas de la figure 4, par contre l'apparition du bruit est tel que le rapport signal/bruit trop faible ne permet pas une lisibilité acceptable.

Ceci nous a donc amenée à faire une étude du comportement des émulsions dans le restituteur. Nous avons étudié les défauts de phase dus à la granularité qui peuvent être de deux natures, soit d'homogénéité, soit de surface. Ces derniers peuvent être éliminés par une immersion convenable du cliché dans un liquide, d'indice de réfraction aussi voisin que possible de celui de la gélatine, entre deux lames planes parallèles optiquement parfaites. Ces études seront exposées dans le paragraphe 4.

De même, certaines conditions d'enregistrement du cliché doivent être réalisées et ont fait l'objet d'une étude sur la linéarité des émulsions (§ 5).

En effet, il faut qu'il y ait linéarité entre l'éclairement reçu E à l'enregistrement du cliché et l'amplitude A qui traverse le cliché.

Nous avons déterminé les courbes $D = F(\log E\,t)$ et $A = f(E)$, ce qui nous a permis de déduire les variations tolérables de densités sur le cliché à améliorer.

4. *Filtre correcteur.* — On augmente le contraste des fins détails d'un cliché par un filtre compensateur qui est un centre absorbant, atténuant les basses fréquences mieux transmises. Pour débrouiller une image prise avec un défaut de mise au point, le filtre aura également une partie déphasante, un anneau centré sur l'image de la source rendant positives les amplitudes négatives des fréquences spatiales (le contraste est inversé). La loi en densités du centre absorbant est déduite de la transmission en amplitudes des fréquences spatiales du cliché à améliorer pour obtenir après filtrage une loi de transmission aussi plate que possible. Dans le cas du défaut de mise au point, la loi de transmission des fréquences spatiales est une fonction rapidement décroissante, la réalisation du filtre absorbant demande beaucoup de précautions, ses dimensions sont très petites : son diamètre est égal à 1 mm avec le montage du restituteur.

Pour obtenir ce filtre on peut enregistrer, par exemple sur une émulsion, l'image d'un disque tournant ce qui donne la loi en densités recherchée.

Il est indispensable également de prendre pour le filtre une émulsion de très

bonne qualité optique et de l'immerger pour ne pas introduire de déphasage et éliminer la diffusion.

La mesure du filtre effectuée au microdensitomètre demande aussi des précautions ; il faut travailler avec une dimension suffisamment fine de la fente exploratrice, tenir compte de l'existence possible de l'effet Callier (la densité d'une plage varie avec la nature de l'éclairage).

Ces études du calcul, de la réalisation du filtre ainsi que la mesure de sa loi en densités font l'objet du paragraphe 6.

L'anneau déphasant et le centre absorbant doivent être dans le même plan F de l'analyse des fréquences spatiales ; aussi l'anneau déphasant est-il déposé sur une lame optiquement parfaite aussi mince que possible.

5. Cliché restitué C′. — Il ne faut pas non plus négliger l'importance du récepteur de l'image restituée. Sa courbe de réponse doit être telle qu'elle puisse conserver toutes les informations sans les modifier.

4. **Comportement des émulsions dans le restituteur. Etude de leurs déphasages.** — Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3.*3*, les caractéristiques de l'émulsion photographique servant de support à l'image à améliorer sont très importantes. Sa qualité optique, ainsi que celle du filtre absorbant (dans le cas d'un filtre photographique), doit être excellente.

L'examen des différents aspects d'une même densité prise sur une émulsion en éclairage incohérent, cohérent et lors du filtrage (avec le filtre compensant le défaut de mise au point) montre combien la granularité de l'émulsion, acceptable en éclairage incohérent, peut devenir nuisible en éclairage cohérent et lors du filtrage (fig. 5, planche III).

Pour cette observation, nous avons placé un microscope visant le plan de l'image C′ restituée. Dans le plan C nous avons placé une plage de densité uniforme prise sur l'émulsion inversible, noir et blanc, Kodatone, film plan (cas de la fig. 5). Elle est éclairée successivement par une source étendue (éclairage incohérent), un trou très fin (éclairage cohérent).

Les défauts de phase de l'émulsion qui apparaissent sont de deux natures : défauts de surface et défauts d'homogénéité.

Les défauts de surface dus au gonflement de la gélatine lors du développement des grains peuvent être éliminés par une immersion de l'émulsion dans un liquide d'indice de réfraction aussi voisin que possible de celui de la gélatine.

Les défauts d'homogénéité varient avec les émulsions ; malheureusement ils ne peuvent être éliminés et il est nécessaire de sélectionner des émulsions en présentant le moins possible.

1. Défauts de surface. — Pour déterminer le liquide d'immersion nous avons observé le cliché au microscope interférentiel Nomarski, méthode très précise. Le microscope utilisé est constitué pour la partie interférentielle par un polariseur, un système biréfringent dédoublant l'image observée, un analyseur. Il y a interférence entre les deux images. Toute variation, faible devant l'interfrange, de l'épaisseur de l'émulsion se traduit par une déformation des franges d'interférences. Ces déformations seront éliminées lorsque le cliché sera immergé dans un liquide de

même indice que celui de la gélatine.

Le liquide d'immersion donnant les meilleurs résultats est le *phtalate de butyle*. Il a également l'avantage de ne pas détériorer les émulsions.

Ce liquide convient parfaitement pour des émulsions noir et blanc négatives telles que le Microfilm Lumière, le film plan Geveart 5E 56, inversibles telles que le Kodatone (fig. 6 et 7, planche IV). Par contre, il ne convient pas pour une émulsion en couleurs telle que le Kodachrome I (fig. 8, planche IV). On peut aisément constater que les diapositives en couleurs présentent un relief important du côté de la gélatine. Il sera donc plus difficile de trouver un liquide d'immersion car son indice devra être plus voisin de celui de la gélatine.

L'observation de traits fins enregistrés sur ces émulsions a servi de test. Le gonflement de la gélatine dû à ces traits est important, même pour un faible contraste (cas de la fig. 7 : traits gris sur fond blanc). Cela nous a fait penser à une méthode pour déceler plus aisément les images à faible contraste au microscope interférentiel par la déformation des franges.

On a mesuré d'autre part au réfractomètre l'indice de réfraction du phtalate de butyle ; on a trouvé $n = 1{,}49$. Remarquons cependant qu'il n'est nécessaire par cette méthode interférentielle de connaître ni l'indice de la gélatine, ni celui du liquide d'immersion.

2. Défauts d'homogénéité. — Les défauts de la surface sensible étant éliminés par l'immersion, il reste à étudier les défauts d'homogénéité des émulsions qui ne sont pas les moindres (fig. 5 B′, C′).

Une observation directe au microscope en C′ sur le montage du restituteur de densités uniformes enregistrées sur diverses émulsions placées en C les met en évidence (fig. 9, planche V).

On a observé une plage de densité uniforme enregistrée sur une émulsion en couleurs, inversible « Kodachrome ». Malheureusement un autre déphasage apparaît, celui de la variation de l'indice du colorant (fig. 9). Aussi n'a-t-on pas recherché davantage un liquide d'immersion approprié (voir § 4.*1*).

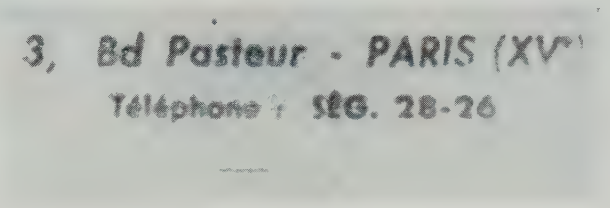
Il faut donc rechercher les émulsions présentant le moins de grain possible. Le spectre du grain dans le plan F a un spectre modifié et amplifié lors du filtrage, ce qui est d'autant plus gênant que le grain est plus important (voir fig. 5 C, C′ et fig. 4 C).

On a observé au microscope interférentiel des densités uniformes prises sur différentes émulsions fabriquées industriellement pour évaluer le déphasage introduit par le grain. La figure 10 (planche VI) montre l'aspect du grain des émulsions Kodatone, Panatomic X, Microfilm, la figure 11 (planche VII) celui du film Gevaert 5E 56. Cette dernière émulsion, nettement la meilleure une fois immergée, ne présente plus de déphasage notable.

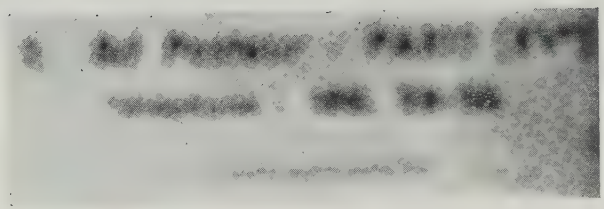
On s'est aussi intéressé au Kodatone, bien qu'elle ne soit pas l'une des meilleures émulsions, mais nous espérions qu'elle répondrait peut-être mieux que les autres aux conditions de linéarité en tant qu'émulsion inversible (voir § 5).

Nous avons étudié les supports d'émulsion qui peuvent eux-mêmes présenter des déphasages. Les supports des émulsions étudiées précédemment ne présentent pas de défaut à l'observation au microscope interférentiel.

A



B



C

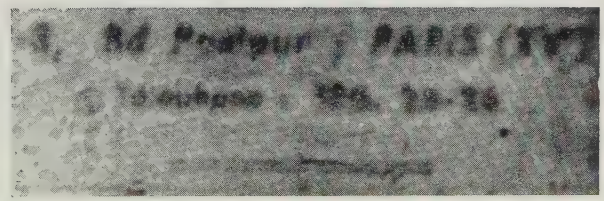


FIG. 3. — A, cliché original ; B, cliché brouillé par défaut de mise au point ; C, cliché obtenu à partir de B par filtrage des fréquences spatiales.

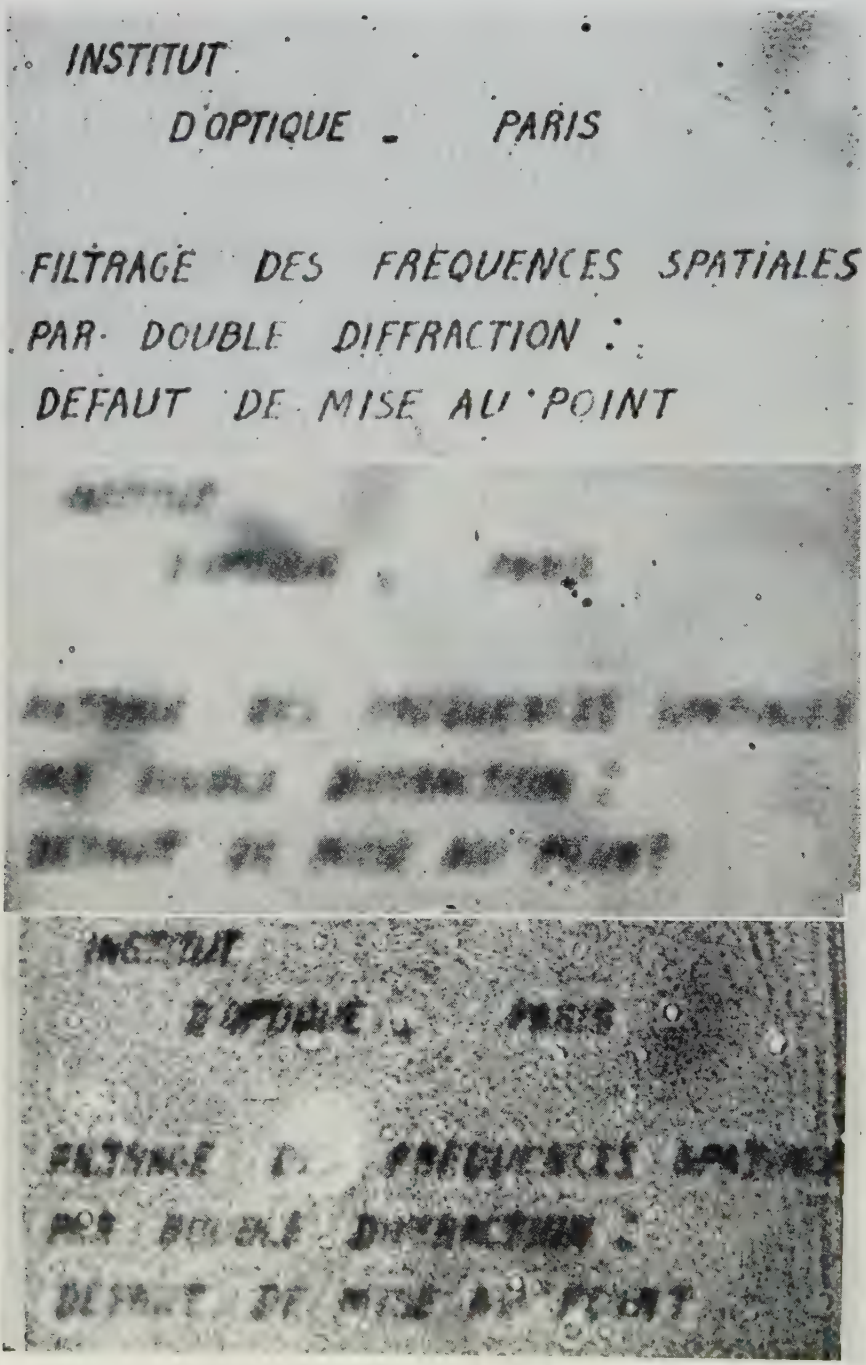
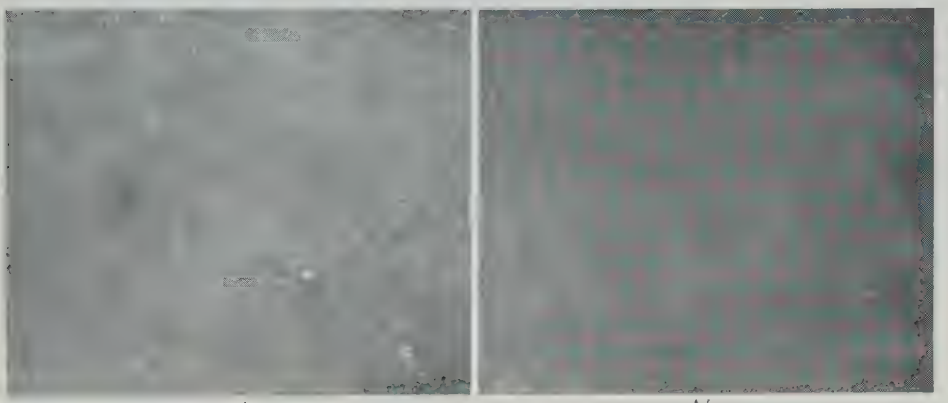


Fig. 4. — A, cliché original ; B, cliché brouillé par défaut de mise au point ; C, cliché obtenu à partir de B par filtrage des fréquences spatiales.

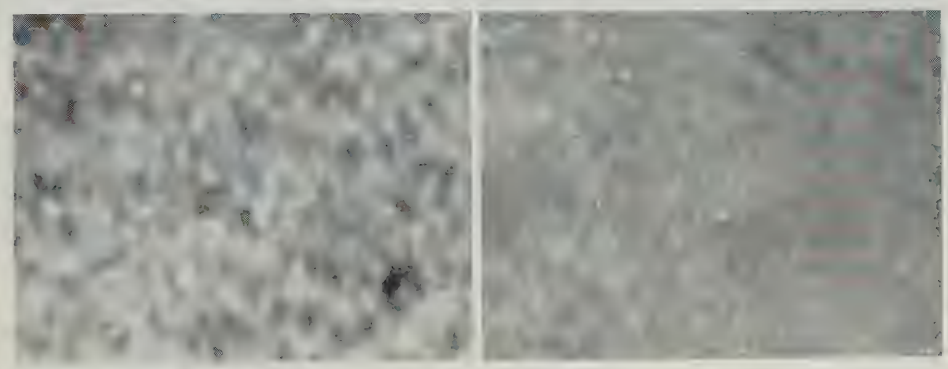
Kodatone

Sans immersion Avec immersion



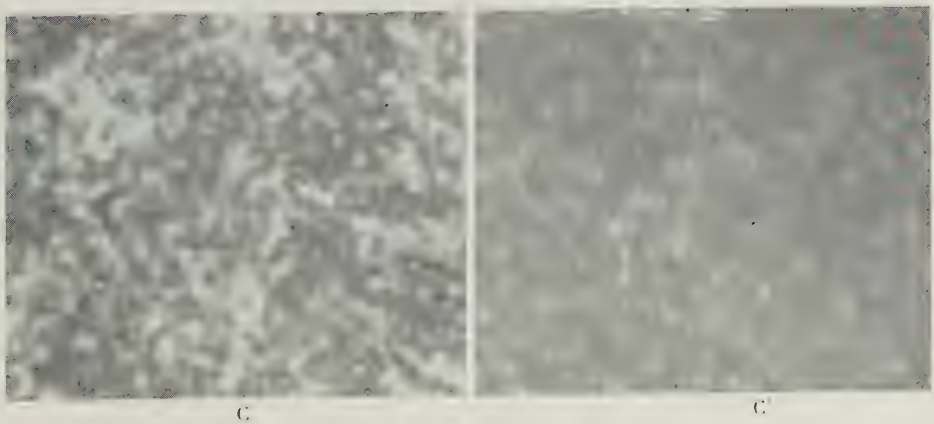
A A′

Eclairage incohérent



B

Eclairage cohéren



C C′

FIG. 5. — Eclairage cohérent + filtre (anneau λ/2 + centre absorbant).
Observation en C′ dans le restituteur d'une densité prise sur Kodatone placée en C.

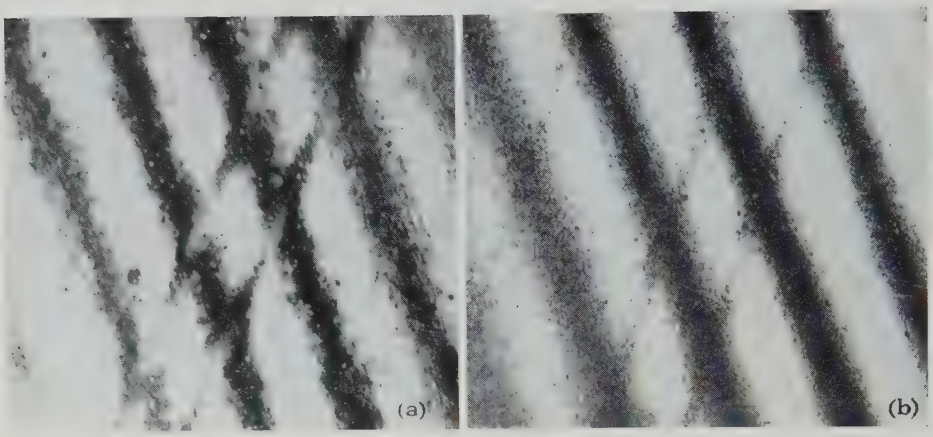


Fig. 6. — Observation au microscope interférentiel Nomarski d'un trait pris sur Kodatone : a) film non immergé ; b) film immergé au phtalate de butyle.

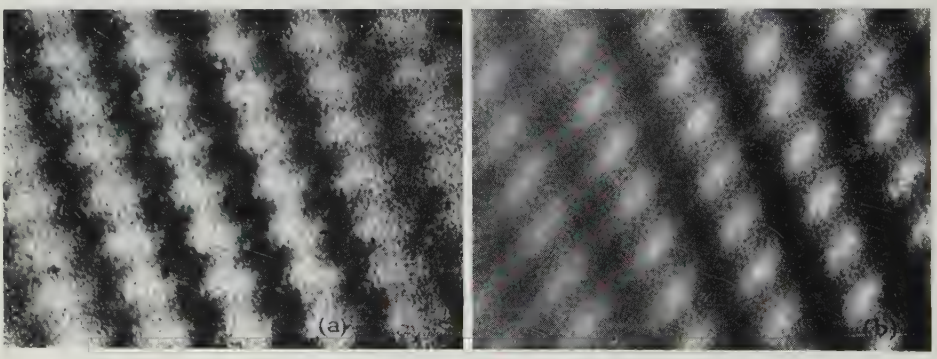


Fig. 7. — Observation au microscope interférentiel Nomarski de traits pris sur microfilm Lumière : a) film non immergé ; b) film immergé au phtalate de butyle.

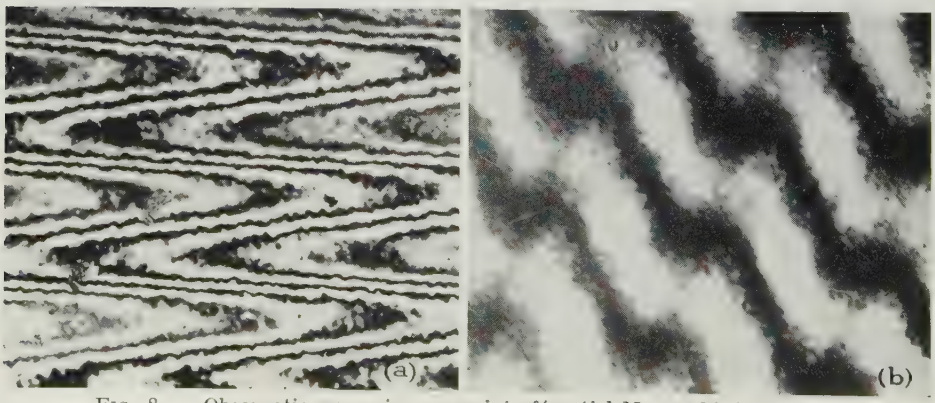
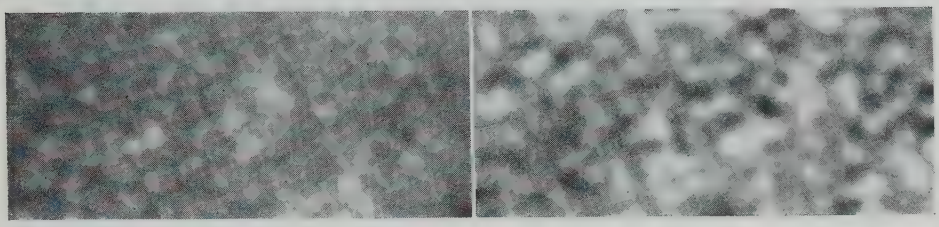
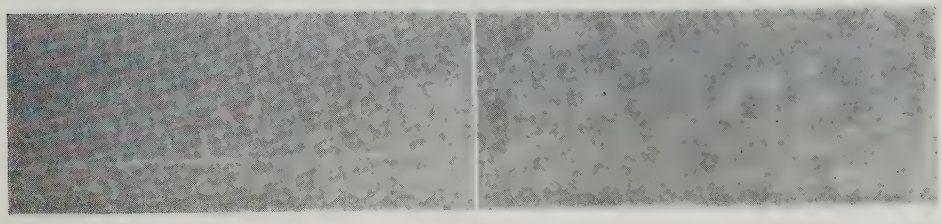


Fig. 8. — Observation au microscope interférentiel Nomarski de traits pris sur Kodachrome I : a) film non immergé ; b) film immergé au phtalate de butyle.

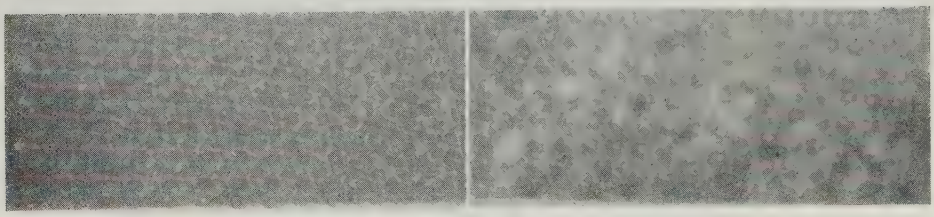
Eclairage incohérent Eclairage cohérent



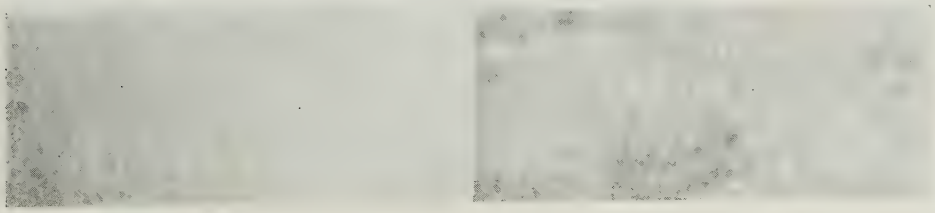
Royal X Pan



Microfilm

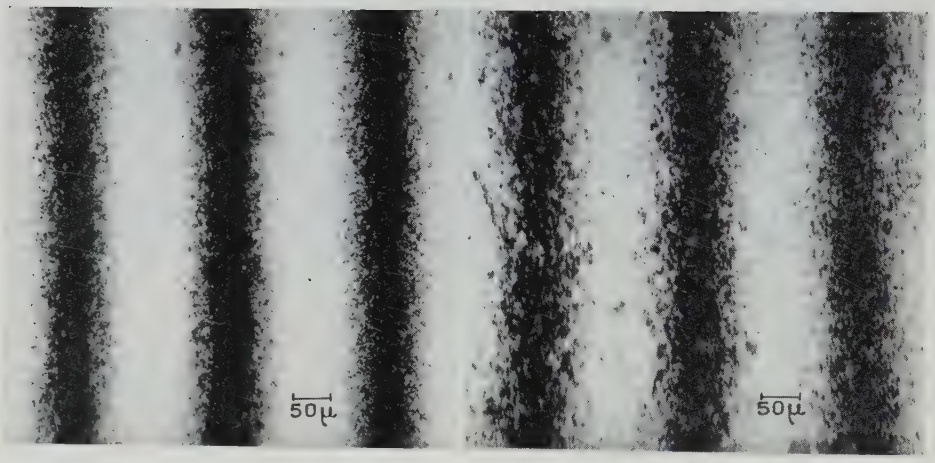


Kodatone

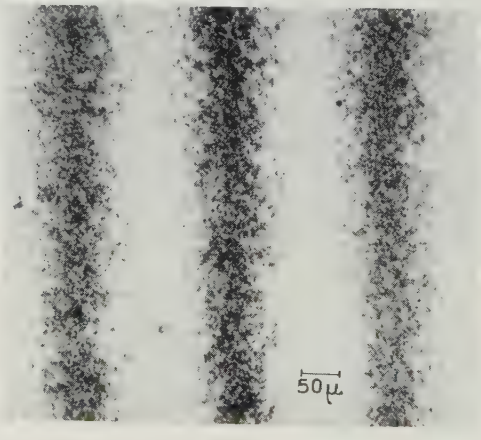


Kodachrome

FIG. 9. — Emulsions immergées au phtalate de butyle. Observations en C' dans le restituteur de densités uniformes enregistrées sur diverses émulsions placées en C.



a) Microfilm Lumière développé au génol sulfite. b) Panatomic X développé au microdol.



c) Kodatone développé au dektol.

Fig. 10. — Observation au microscope interférentiel Nomarski de densités uniformes prises sur différentes émulsions : microfilm, Pan X, Kodatone.

3. Conclusion. — On constate que l'on est amené à utiliser comme support d'image des émulsions à grain très fin, très peu sensibles, mais à haut pouvoir de résolution, qui une fois immergées sont de très bonne qualité optique.

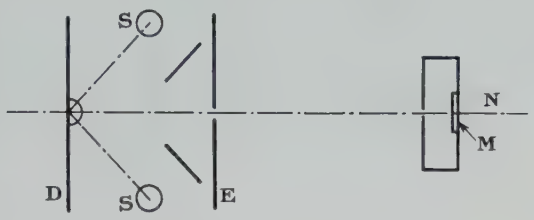


Fig. 12. — D, écran diffusant ; S, sources de lumière ; E, écran ; M, émulsion, N, normale à l'écran.

5. **Linéarité des émulsions.** — Le principe sur lequel repose le filtrage n'est valable que si la linéarité du support transparent de l'image à améliorer est réalisée : il faut que l'amplitude A après la traversée du cliché soit une fonction linéaire de l'éclairement E reçu à l'enregistrement.

Ceci nous a amenée à étudier les domaines de linéarité de quelques émulsions, déjà sélectionnées pour leurs qualités optiques.

1. Dispositif pour obtenir les sensitogrammes. — Pour connaître les courbes sensitométriques $D = F(\log E\,t)$ et $A = f(E)$ des émulsions, il a été nécessaire de réaliser un dispositif pour obtenir des densités correspondant à différents éclairements connus, car il fallait opérer dans les mêmes conditions que lors de la prise de vue des clichés à améliorer : même éclairage, durée de pose constante, etc.

En effet, il était essentiel d'opérer avec le même éclairage, car la sensibilité spectrale des émulsions est loin d'être indépendante de la longueur d'onde de la lumière émise.

L'émulsion est éclairée par un écran diffusant. La distance écran-émulsion varie d'une plage à la suivante d'une valeur telle que $\log E\,t$ varie de 0,1 (fig. 12).

On a réalisé des sensitogrammes sur : Microfilm, 35 mm Lumière ; Panatomic X, 35 mm Kodak ; Kodatone, film plan ; Gevaert 5E 56, film plan.

Pour les trois premiers on a utilisé comme sources de lumière deux lampes Photoflood de 500 W. Pour le film Gevaert 5E 56 sa sensibilité spectrale étant maximum dans le violet et l'ultraviolet on a utilisé deux lampes Bohl.

2. Développement des sensitogrammes. — Il est essentiel de noter les conditions de développement car elles ont une influence capitale sur les courbes sensitométriques. On a opéré à 20° C, température qui donne les meilleurs résultats.

On a développé les films de 35 mm dans des cuves Super Inox avec agitation toutes les minutes. Les films plans ont été développés dans des cuves normales avec agitation intermittente. On a recherché des révélateurs qui donnent un effet normal et un développement à grain fin.

On a développé :

au Génol Sulfite, 8 mn le Microfilm 35 mm Lumière ;
au Microdol, 8 mn le Microfilm 35 mm Lumière ;
au Microdol, 8 mn le Panatomic X Kodak 35 mm ;
au Dektol (1), 2 mn le Kodatone ;
au D 158 (2), 4 mn le Gevaert 5E 56.

(1) Un volume Dektol + deux volumes d'eau.
(2) Un volume D 158 + un volume d'eau.

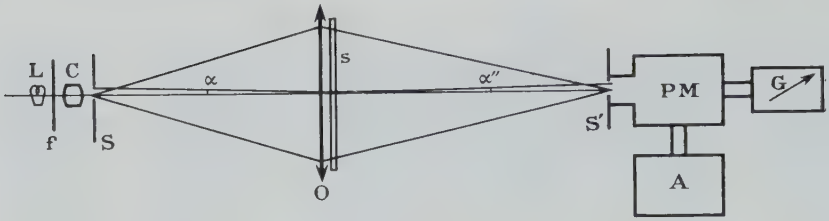


Fig. 13. — L, lampe ; f, filtre ; C, condenseur ; S, trou-source, O, objectif ; s, sensitogramme immergé ; A, alimentation.

3. Dispositif pour mesurer les sensitogrammes. — Pour mesurer les densités il est absolument nécessaire de se placer dans les conditions mêmes du filtrage.

En effet, la valeur de la densité dépend des angles α et α', des flux incident et émergent reçus par l'émulsion. C'est l'effet Callier [9]. Il n'est donc pas possible d'utiliser les microdensitomètres habituels où la densité est mesurée en lumière diffuse (α et α' grands).

Ne pouvant faire les mesures sur le restituteur, nous avons réalisé un montage identique. Il comprend (fig. 13) :

a) un trou éclairé par une lampe Bohl au moyen d'un condenseur (il s'agit d'une lampe à décharge à vapeur de mercure sous moyenne pression). La stabilité de la luminance de la source est obtenue au bout de 1 h environ. La lumière est rendue monochromatique au moyen d'un filtre ne laissant passer que la raie $\lambda = 0{,}55\ \mu$, comme sur le restituteur (on ne risque pas d'être gêné par le fait que la transmission des émulsions peut varier avec la longueur d'onde) ;

b) un objectif parfaitement corrigé (type Clairaut) ;

c) un photomultiplicateur dont la partie sensible (photocathode) se trouve dans l'image S′ de la source et est munie d'un diaphragme circulaire. Le diamètre du trou-source et du diaphragme du photomultiplicateur sont tels que les angles α et α' sont les mêmes que sur le restituteur. On a $\alpha \simeq \alpha' = 0{,}003\ 6$ très petits (lumière cohérente). On travaille à $2\,f$;

d) une alimentation stabilisée à haute tension fabriquée par l'Observatoire de Paris ;

e) un galvanomètre dont les déviations sont proportionnelles au flux lumineux reçu par la photocathode.

Cette linéarité est réalisée avec le photomultiplicateur suffisamment sensible utilisé pour permettre de travailler toujours sur la même sensibilité G du galvanomètre.

Les sensitogrammes sont immergés de la même façon que sont immergés dans le restituteur les clichés à améliorer. La diffraction due aux défauts de surface est éliminée, diffraction qui pourrait changer la valeur de la densité. Ils sont placés contre l'objectif O (fig. 13).

4. Résultats. — Les déviations du galvanomètre donnent F/F_0, rapport du flux transmis par la densité au flux transmis par le support de l'émulsion, soit A^2 et $D = \log(F_0/F)$. Ceci permet de tracer les courbes $D = F(\log E\,t)$ et $A = f(E)$ [fig. 14 à 16].

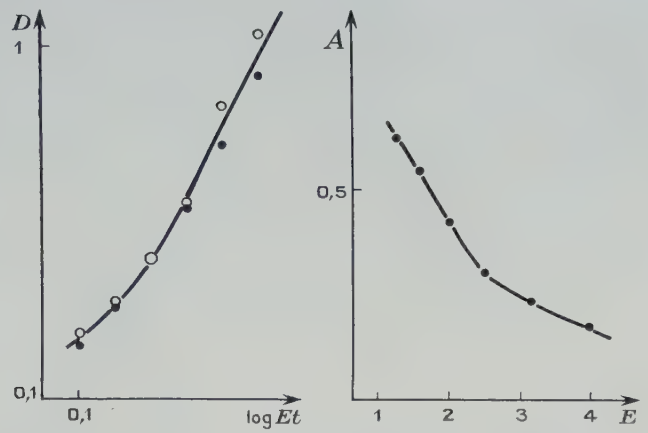


FIG. 14. — Panatomic X 35 mm, développé 8 mn au Microdol à 20° C.

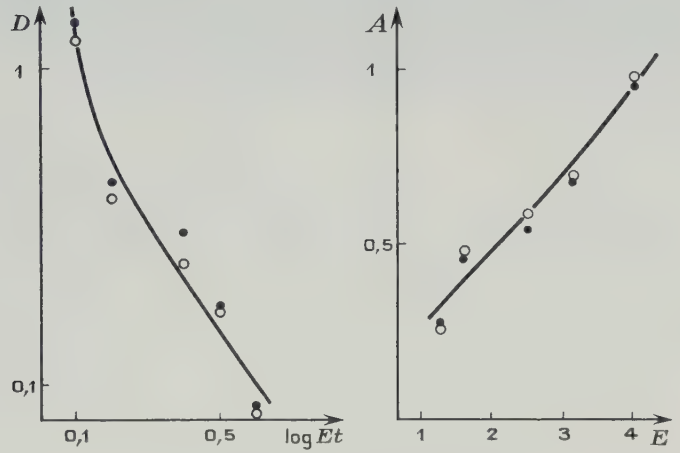


FIG. 15. — Kodatone, film plan inversible développé 2 mn au Dektol à 20° C.

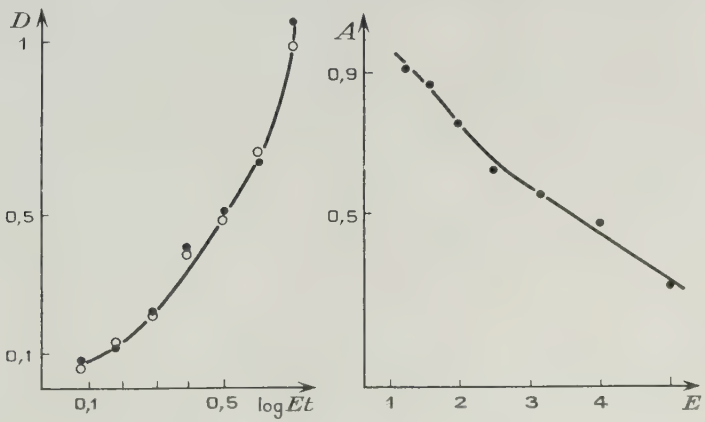


FIG. 16. — Microfilm 35 mm, développé 8 mn au Génol sulfite.

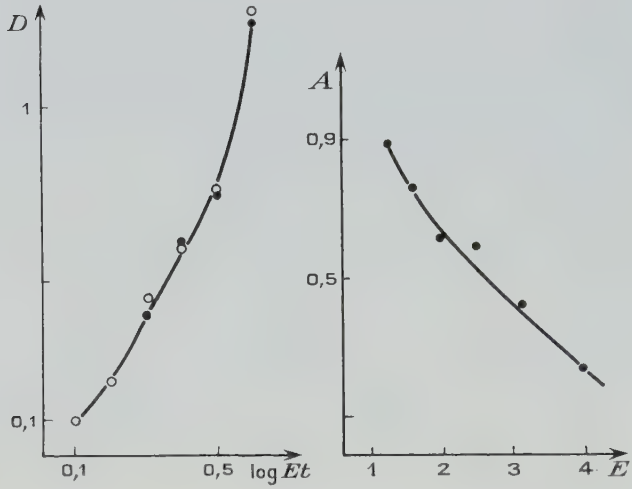


FIG. 17. — Microfilm 35 mm, développé 8 mn au Microdol à 20° C.

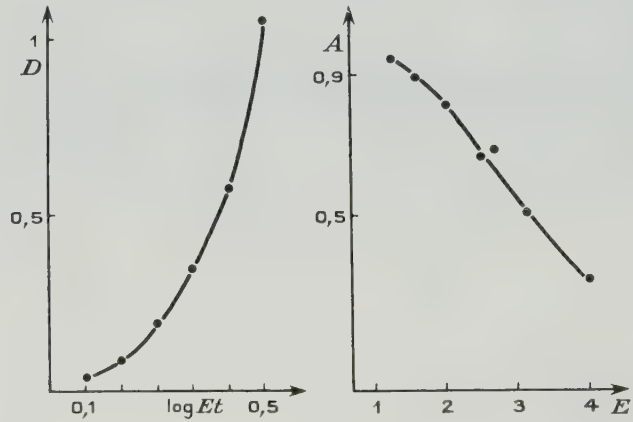


FIG. 18. — Gevaert 5E 56, film plan développé 4 mn au D 158 à 20° C.

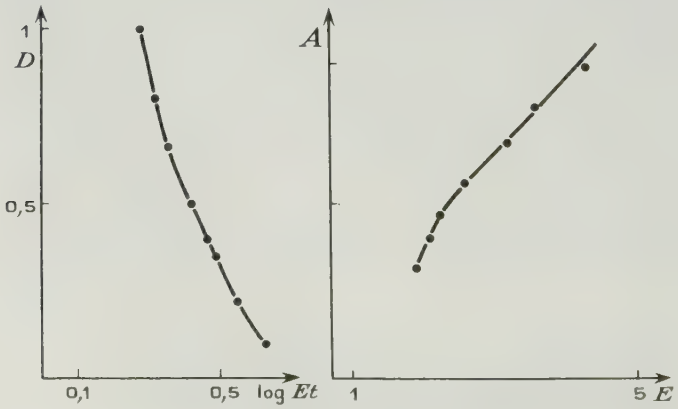


FIG. 19. — Microfilm 35 mm, développé 8 mn au Génol sulfite à 20° C ; négatif + contretype.

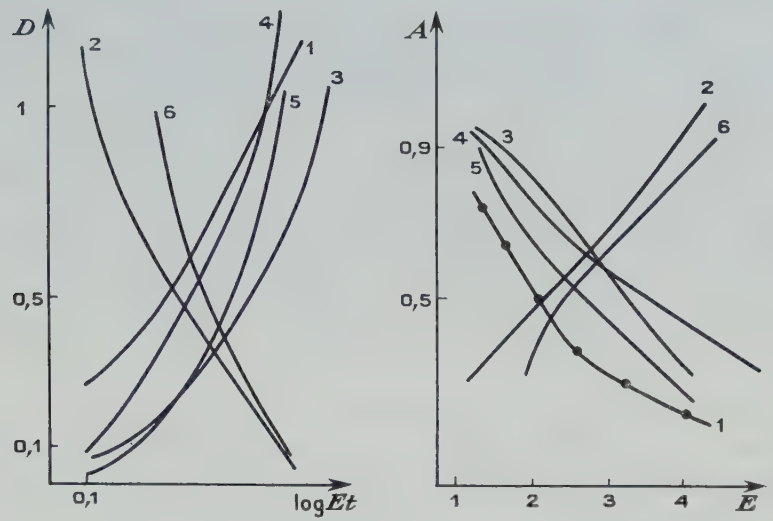


FIG. 20. — Linéarité de quelques émulsions.

Domaine de linéarité.

Panatomic X développé au Microdol :

1° $1{,}26 \leqq E \leqq 2{,}5$, $0{,}1 \leqq \log E \leqq 0{,}3$, $0{,}25 \leqq D \leqq 0{,}65$;

2° $2{,}5 \leqq E \leqq 4$, $0{,}3 \leqq \log E \leqq 0{,}5$, $0{,}65 \leqq D \leqq 1{,}02$.

Kodatone développé au Dektol :

$2 \leqq E \leqq 4$, $0{,}3 \leqq \log E \leqq 0{,}6$, $0{,}04 \leqq D \leqq 0{,}65$.

Microfilm développé au Génol Sulfite :

1° $1{,}59 \leqq E \leqq 2{,}5$, $0{,}2 \leqq \log E \leqq 0{,}4$, $0{,}12 \leqq D \leqq 0{,}4$,

2° $2{,}5 \leqq E \leqq 4$, $0{,}4 \leqq \log E \leqq 0{,}6$, $0{,}4 \leqq D \leqq 0{,}65$.

Microfilm développé au Microdol :

1° $1{,}26 \leqq E \leqq 2$, $0{,}1 \leqq \log E \leqq 0{,}3$, $0{,}1 \leqq D \leqq 0{,}41$;

2° $2{,}5 \leqq E \leqq 4$, $0{,}4 \leqq \log E \leqq 0{,}6$, $0{,}61 \leqq D \leqq 1{,}24$.

Gevaert 5E 56 développé au D 158 :

$2 \leqq E \leqq 4$, $0{,}3 \leqq \log E \leqq 0{,}6$, $0{,}19 \leqq D \leqq 1{,}06$.

Si on contretype le Microfilm développé avec Génol Sulfite également sur Microfilm développé au Génol Sulfite dans les mêmes conditions, on augmente le domaine de linéarité. On obtient les résultats ci-dessous :

$2{,}24 \leqq E \leqq 4{,}3$, $0{,}35 \leqq \log E \leqq 0{,}63$, $0{,}1 \leqq D \leqq 0{,}63$.

L'inconvénient est qu'on est obligé de procéder à un contretypage, opération supplémentaire qui, dans la mesure du possible, est à éviter pour espérer obtenir les meilleures images.

On avait pensé qu'avec les émulsions inversibles (Kodatone par exemple) avant un $\gamma \simeq 2$ (en utilisant un révélateur approprié) on augmenterait le domaine de linéarité, car en effet on a $D = \log (A_0^2/A^2) = \gamma \log E\,t$, ce qui entraîne $A = \alpha E$ si $\gamma = -2$, mais pratiquement on ne peut pas considérer que γ soit constant dans un domaine assez important, ce qui fait que l'on ne gagne rien.

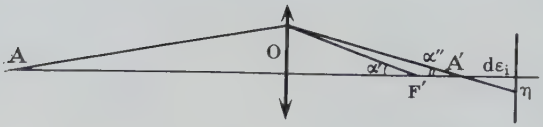


FIG. 21. — A, objet ; O, objectif.

En conclusion, on constate que le domaine de linéarité (fig. 20) est très faible ; on ne peut tolérer qu'une *variation en densités* sur le cliché à restituer de 0,3, dans le cas le plus favorable. Le domaine de linéarité varie plus ou moins avec l'émulsion.

L'émulsion Gevaert 5E 56, ayant la meilleure qualité optique (grain très fin, pas de déphasage notable) et un des domaines de linéarité parmi les moins faibles, sera l'émulsion utilisée pour nos essais d'amélioration de clichés. On voit qu'il est nécessaire d'effectuer, avant de prendre le cliché à améliorer, un voile préalable de densité 0,19.

6. **Défaut de mise au point et filtre correcteur.** — Se plaçant dans les meilleures conditions étudiées précédemment (choix convenable de l'émulsion, immersion et linéarité réalisées) nous avons enregistré un cliché avec un défaut de mise au point donné et déterminé le filtre correcteur pour compenser le défaut. Il nous a semblé intéressant de choisir un tel défaut où la loi de transmission en amplitudes des fréquences comporte une partie négative. Cela nécessite un filtre absorbant et déphasant.

1. Défaut de mise au point. — A) CONDITIONS DE PRISE DE VUE. — Avec un appareil photographique on enregistre un objet en faisant un défaut de mise au point tel que l'on ait dans l'espace image un dépointage $d\varepsilon_1 = 4$ mm. Il en résultera une tache de diffusion de rayon η pour un point sur le film, tel que $\eta = \alpha'' \, d\varepsilon_i$.

Pour réaliser ce défaut on agit sur le tirage de l'objectif ; la distance OA de l'objet à l'objectif varie d'une quantité négligeable (fig. 21).

Nous avons pris un objectif à $f/10$, de longueur focale 68 mm, travaillant à 59 cm. On a $\alpha' = 1/20$ rd, $FA.F'A' = -f^2$, $F'A' = 68^2/522$,

$$\alpha'' = (OF'/OA')\,\alpha' = 0{,}88/20\,, \qquad 2\eta = 0{,}88 \times 0{,}40 = \underline{0{,}35 \text{ mm}}\,.$$

B) LOI DE TRANSMISSION THÉORIQUE EN AMPLITUDES DES FRÉQUENCES SPATIALES. — Avec un défaut de mise au point correspondant à une tache de diffusion de diamètre 2η, la loi de transmission en amplitudes des fréquences spatiales est $2\,J_1(2\pi\eta/a)/(2\pi\eta/a)$, où $1/a$ est la fréquence spatiale (fig. 22) ; $T(A)$ s'annule pour $Z = 3{,}83$, $Z = 7{,}0$, etc. avec $Z = 2\pi\eta/a$ auxquels correspondent les fréquences non transmises $1/a_1$, $1/a_2$, etc.

Entre $1/a_1$ et $1/a_2$, $2\pi\eta/a$ est négatif ; le contraste est inversé. Comme $2\eta = 0{,}35$ mm on a $1/a_1 = 3{,}5$ mm^{-1}, $1/a_2 = 6{,}4$ mm^{-1}.

C) RÉALISATION DU CLICHÉ. CHOIX DE L'OBJECTIF. — Pour enregistrer le défaut, il est indispensable d'opérer avec un objectif qui donne une tache de diffusion uniformément éclairée. Il faut donc opérer avec un objectif très bien corrigé, dépourvu de toutes aberrations. Si l'on a un résidu d'aberration de sphéricité, par exemple, on ne pourra obtenir comme tache de diffusion un disque uniformément éclairé et il en résultera que la transmission des fréquences spatiales ne sera pas la fonction $2\,J_1(Z)/Z$ mais la transformée de Fourier de la tache de diffusion où la répartition des éclairements ne sera pas constante.

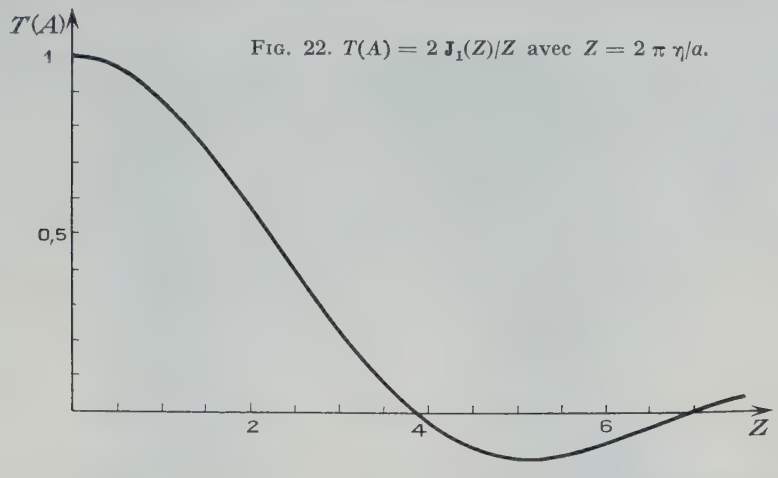


FIG. 22. $T(A) = 2\,J_1(Z)/Z$ avec $Z = 2\,\pi\,\eta/a$.

Nous avons été obligée d'éliminer un certain nombre d'objectifs présentant du chromatisme, de l'astigmatisme, etc.

La figure 23 (planche VII) montre l'image donnée par un objectif de longueur focale 68 mm, ouvert à $f/10$, travaillant à 59 cm, sans défaut de mise au point, puis avec un défaut de mise au point de $d\varepsilon_1 = 4$ mm. Cet objectif est correct, on observe très nettement l'inversion de contraste et les fréquences non transmises. Avec d'autres objectifs nous ne sommes arrivée à obtenir ni l'inversion de contraste, ni une image identique dans tout le champ.

On enregistre l'objet en opérant dans les conditions de linéarité expliquées au paragraphe 5.*4* ; il faut effectuer un voile préalable et avoir un objet de faible contraste.

Remarquons dès maintenant qu'il est nécessaire pour obtenir un cliché débrouillé que les fréquences du cliché soient dans le domaine des fréquences où le filtre agit. Si le filtre ne contient que des fréquences supérieures à celles de ce domaine, on conçoit aisément que le filtre n'aura aucune action et que l'on n'obtiendra aucune amélioration. Il ne faut pas prendre n'importe quel objet.

2. Filtre correcteur. — A) CALCUL THÉORIQUE. — Pour corriger le défaut, nous plaçons dans le plan de l'image de la source un filtre qui va renforcer les fréquences affaiblies ; si T_D est la transmission en amplitudes des fréquences spatiales du cliché brouillé, T_F est celle du filtre, nous pensons qu'il faut obtenir une loi de transmission des fréquences aussi plate que possible, soit $T_D\,T_F = \text{Cte}$.

Notons que les fréquences qui manquent par suite du défaut de mise au point, $1/a_1$, $1/a_2$, ..., ne pourront être rétablies. La restitution ne peut être complète.

$T_D = 2\,J_1(Z)/Z$ a des parties négatives ; le premier minimum correspond à une transmission $T_D = 0{,}14$, $T_D^2 = 0{,}02$ en intensité (fig. 24).

Le premier maximum ne correspond plus qu'à une transmission en amplitude de 0,006 et en intensité de 0,004. On peut donc considérer la transmission T_D seulement dans le domaine $0 \leqq 1/a \leqq 6{,}4\ \text{mm}^{-1}$.

Le filtre se composera donc :

d'un filtre déphasant de π pour inverser le signe des amplitudes des fréquences

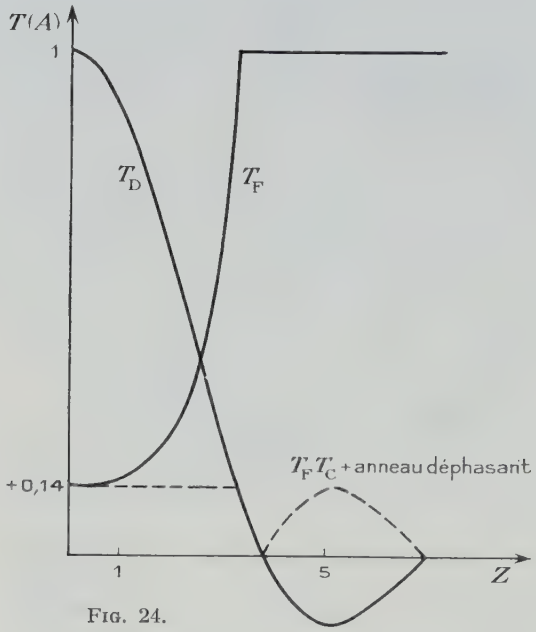


Fig. 24.

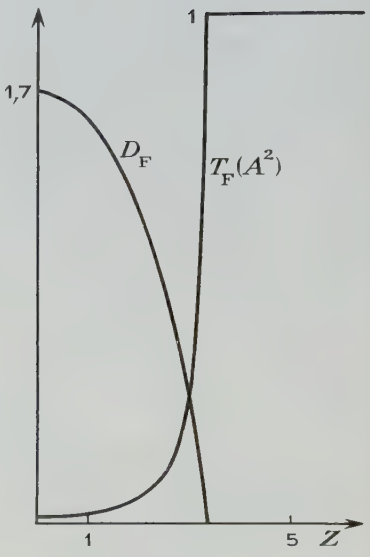


Fig. 25.

pour lesquelles il est négatif,

d'un filtre absorbant dégradé pour atténuer les basses fréquences par rapport aux autres dont le facteur de transmission est très faible. Sa loi de transmission est $T_F = \text{Cte}/T_D$.

B) Réalisation pratique. — a) *Filtre déphasant.* — Le filtre est un anneau dont les diamètres sont respectivement $2\,D/a_1 = 1{,}1$ mm pour le diamètre intérieur, $2\,D/a_2 = 2{,}1$ mm pour le diamètre extérieur, où $D = 300$ mm ; $1/a_1$ et $1/a_2$ sont les fréquences spatiales non transmises.

L'anneau déphasant est déposé sur une lame de verre aussi mince que possible pour que le filtre absorbant et l'anneau déphasant soient sensiblement dans le même plan ; cette lame a une épaisseur de 0,56 mm et un diamètre de 10 mm. Elle doit être très bonne optiquement. Elle a été réalisée à l'Institut d'Optique.

L'anneau déphasant doit être parfaitement transparent ; il est réalisé en évaporant sur cette lame un matériau d'indice aussi voisin que possible de celui de la lame de verre et d'épaisseur telle que le déphasage introduit soit de π. Il a été réalisé par la M. T. O.

b) *Filtre absorbant.* — 1° *Enregistrement.* — On prend $T_D\,T_F = 0{,}14$, valeur de la transmission du premier minimum (fig. 24).

Le filtre aura une densité maximum pour $1/a = 0$ et elle diminuera pour être nulle à partir de la fréquence correspondant à $T_D = 0{,}14$ (fig. 25). Pour réaliser ce filtre on trace sur un disque deux courbes qui s'expriment en coordonnées rectangulaires par $\zeta = \pm\, g(\xi)$. On laisse blanche la région entourée par ces courbes et noire la région extérieure (fig. 26).

En faisant tourner ce disque on a une répartition d'éclairement $a\,g(\xi)/\xi$ si l'am-

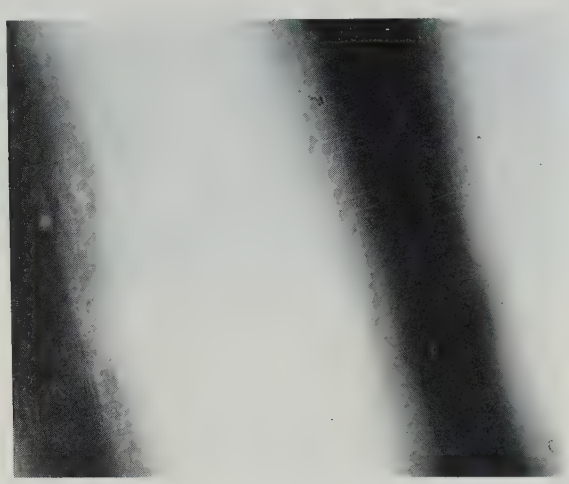


FIG. 11. — Observation au microscope interférentiel Nomarski d'une densité uniforme ($D \simeq 0{,}4$) prise sur Gevaert 5E 56.

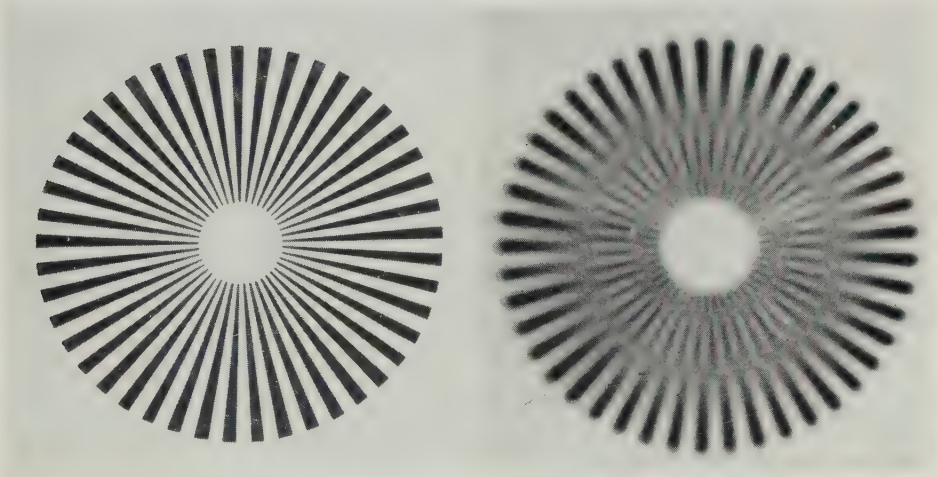


FIG. 23.

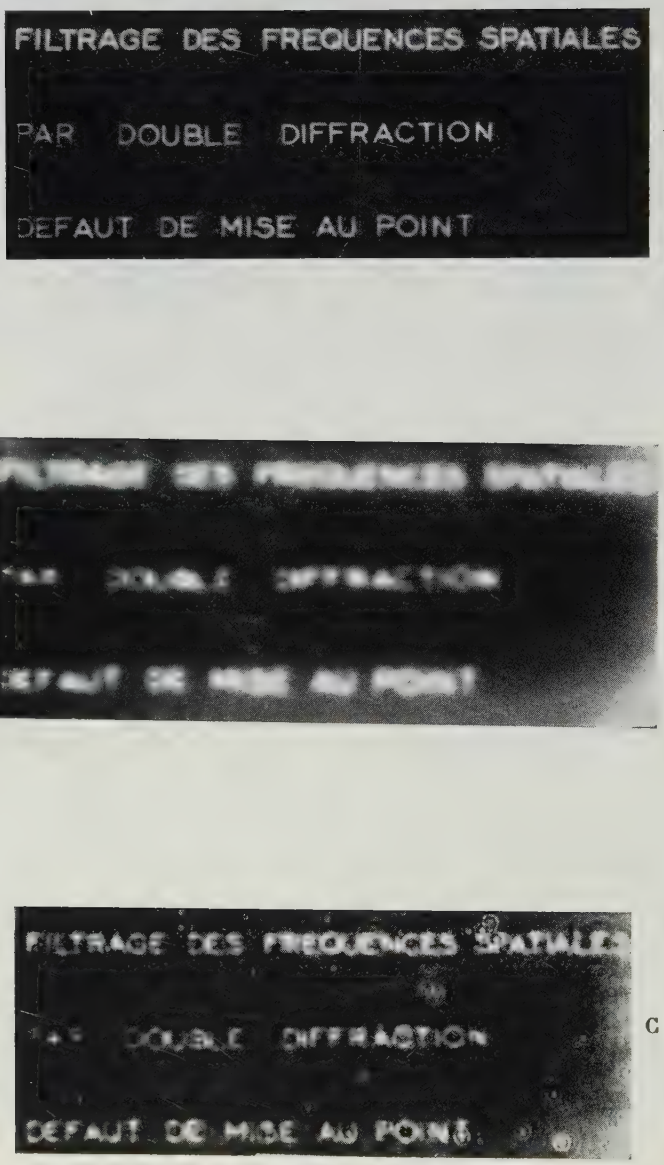
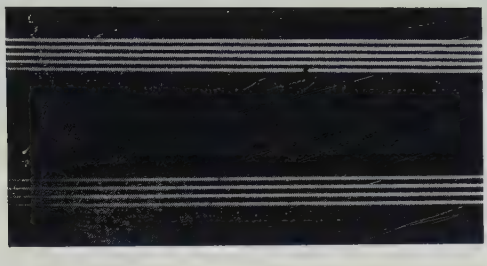
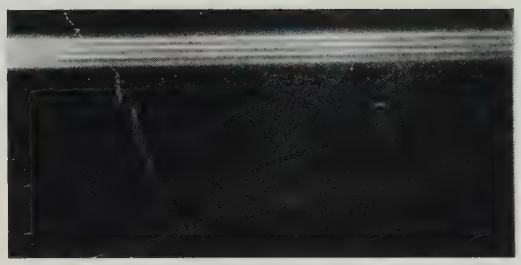


Fig. 33. — Le cliché C a été restitué avec le filtre T.

A



B



C

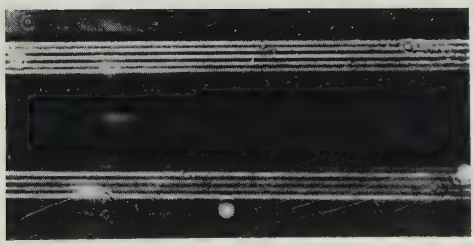
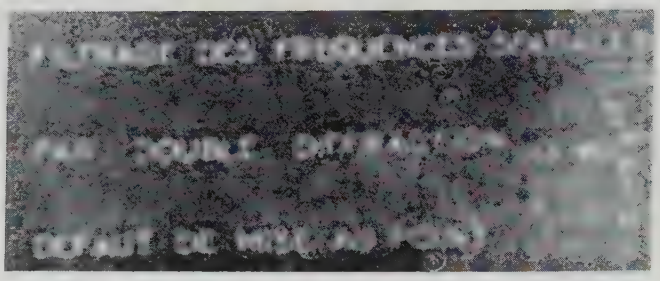
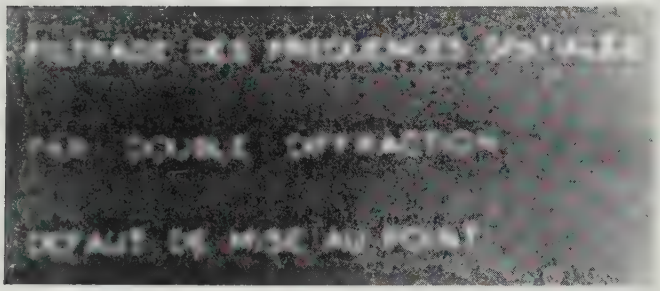


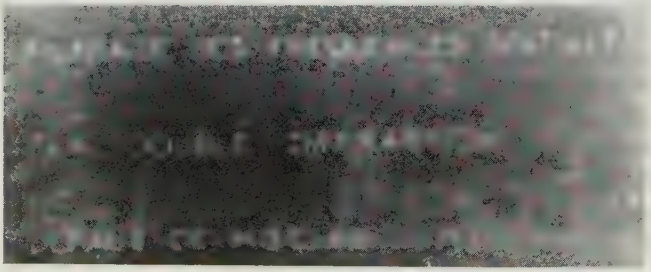
FIG. 34. — Le cliché C a été restitué avec le filtre T.



F



17



A

Fig. 37. — Comparaison de clichés restitués du texte brouillé de la figure 33 avec divers filtres F, 17, A.

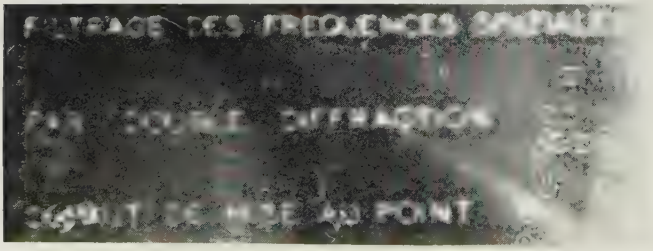


Fig. 38. — Cliché restitué du texte brouillé de la figure 33 avec le filtre 21.

plitude n'est pas trop grande. On enregistre photographiquement sur film ce disque tournant.

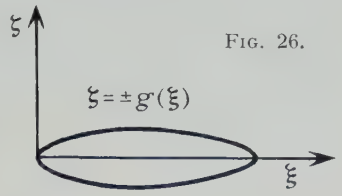


FIG. 26.

La densité du filtre enregistré sera donc $D = \gamma \log[g(\xi)/\xi]$, avec $\xi = \lambda D(/a)\, G$, où G est le grandissement auquel travaille l'objectif. On peut donc calculer aisément $g(\xi)$.

γ et $g(\xi)$ dépendent de l'émulsion utilisée.

Pour prendre le filtre on a utilisé du microfilm, émulsion à grain fin, comme nous l'avons vu précédemment (§ 4) et à support transparent, développé au Génol Sulfite. La densité du filtre varie de 0 à 1,7. On a pris pour γ les valeurs données sur la courbe sensitométrique obtenue (voir § 5.*4*).

On obtient le tableau I, avec

$$Z = 2\pi\eta/a \simeq 1{,}1/a\,, \quad 1/a = Z/1{,}1\,, \quad \rho = \lambda D/a = 0{,}165\, a \text{ mm}.$$

Le diamètre maximum du filtre est 1 mm.

TABLEAU I

$Z = \frac{2\pi\eta}{a}$	T_D	$T_F = \frac{0{,}14}{T_D}$	$D = \log\left(\frac{1}{T_F}\right)^2$	γ	$\frac{g(\xi)}{\xi}$	$\frac{1}{a} = \frac{Z}{1{,}1}$	$\rho = \frac{\lambda D}{a}$	$g(\xi) = \xi T_F{}^{2/\gamma}$
0	1	0,14	1,70	3	3,71	0	0	0
0,5	0,97	0,144	1,684	3	3,63	0,45	0,076	0,275
1	0,88	0,159	1,597	3	3,404	0,91	0,151	0,514
1,5	0,74	0,189	1,446	3	3,03	1,365	0,227	0,686
2	0,575	0,244	1,225	3	2,56	1,82	0,303	0,775
2,5	0,4	0,35	0,912	3	2,18	2,75	0,38	0,765
3	0,225	0,622	0,412	1,5	1,37	2,73	0,46	0,63
3,3	0,14	1	0			3	0,5	0,5

La courbe $\zeta = \pm g(\xi)$ calculée (fig. 26) ne donnera pas exactement la loi en densité du filtre voulue après enregistrement photographique ; nous avons pris en effet pour γ des valeurs approchées pour huit points sur la courbe sensitométrique. De plus les lois sensitométriques ne sont pas les mêmes, rigoureusement, pour des plages étendues (cas pour la mesure des densités et de γ) et pour de très petits domaines (cas du filtre où la densité doit varier de 0 à 1,7 sur un rayon de 0,5 mm).

On sera obligé à partir de ce premier filtre de refaire d'autres filtres qui donneront exactement la loi en densité voulue ; on procédera par approximations successives.

Etant donné les dimensions du filtre il est nécessaire de mesurer sa loi en densité au microdensitomètre.

2° *Mesure de la loi en densité.* — Le microdensitomètre utilisé est le dernier microdensitomètre Vassy réalisé par la Compagnie des Compteurs. Le principe de l'appareil est celui du tarage ; sur la figure 27 nous avons schématisé la partie où l'on place la densité à mesurer.

Les valeurs des densités mesurées sur cet appareil ne vont pas être égales à celles mesurées dans les conditions du restituteur. Les angles (dont nous avons déjà parlé au paragraphe 5.*3*) diffèrent dans les deux cas (effet Callier).

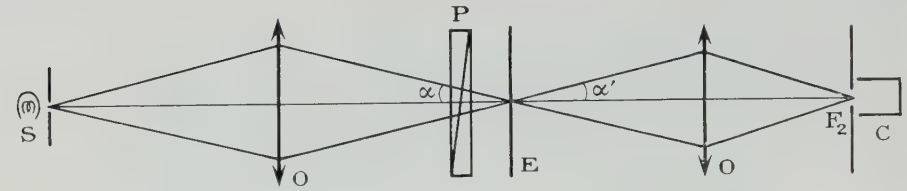


FIG. 27. — S, source ; O, objectifs ; P, coin photométrique ; E, émulsion ; C, cellule photoélectrique.

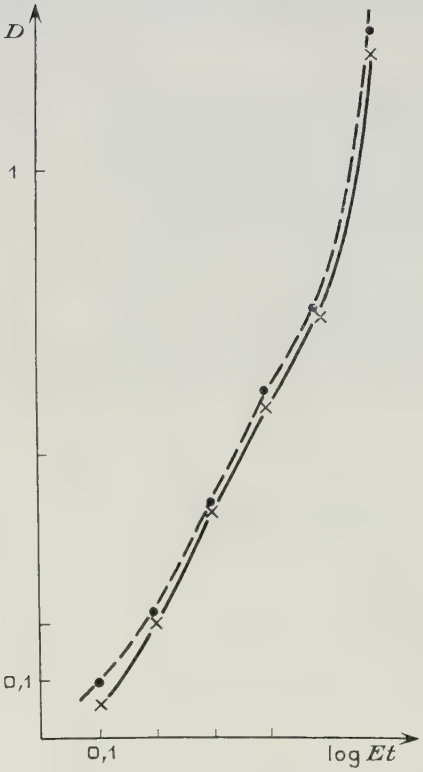


FIG. 28. — Microfilm immergé : en trait plein, densités mesurées sur le microdensitomètre ; en tirets, densités mesurées sur le montage identique à celui du restituteur.

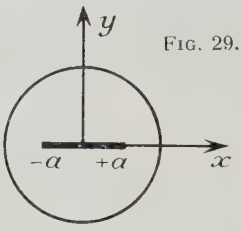


FIG. 29.

Les écarts sont plus grands si les densités placées sur le microdensitomètre ne sont pas immergées. Si elles sont immergées les écarts sont négligeables pour les fortes et moyennes densités, appréciables seulement pour les très faibles densités (fig. 28).

Une importante difficulté s'est présentée : ce sont les dimensions de la fente F_2 exploratrice. Elles doivent être suffisamment petites devant celles du filtre, sinon en un point on mesurera la densité intégrée sur toute la surface de la fente exploratrice. D'autre part, on est gêné par le fait qu'en diminuant trop les dimensions de F_2, l'appareil n'a plus aucune sensibilité. La plage exploratrice est une fente dont une dimension peut être négligée (on peut la réduire considérablement).

L'intensité reçue par la cellule sera

$$\int_{-a}^{+a} I(x)\,dx = \text{Cte} \int_{-a}^{+a} T^2(x)\,dx\,,$$

où a est la hauteur de la fente F_2. La transmission mesurée du filtre sera

$$\int_{-a}^{+a} T^2(x)\,dx \Big/ \int_{-a}^{+a} T_0^2\,dx = \frac{1}{2a} \int_{-a}^{+a} T^2(x)\,dx\,;$$

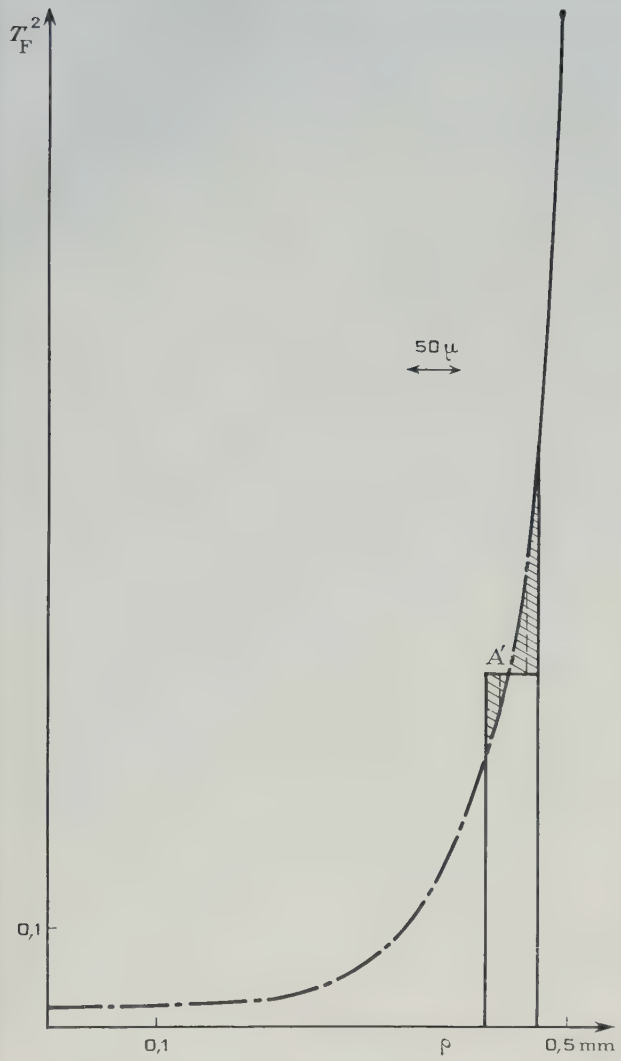


FIG. 30.

ρ	T_f^2
0	0,02
0,08	0,021
0,15	0,025
0,23	0,35
0,3	0,06
0,38	0,122
0,46	0,39
0,5	1,00

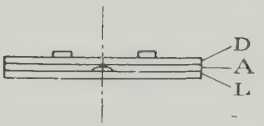


FIG. 31. — D, filtre déphasant ; A, filtre absorbant immergé ; L, lame mince.

T_0^2 est la transmission en intensité lorsqu'on explore une région du film non impressionnée, où la transmission est constante et maximum (fig. 29).

Sur la figure 30 nous avons représenté la courbe de la transmission suivant un rayon. On voit que l'écart entre T^2 mesuré et la valeur vraie en un point est la différence entre les deux aires hachurées de la figure. Plus la fente est petite, plus cet écart est négligeable.

Prenons une fente F de 50 μ de longueur et plaçons-nous en A. La précision de la mesure sera de 10 %. Si on ne prend plus qu'une fente de 25 μ la précision de la mesure devient de 2,5 %. Nous avons adopté comme hauteur de fente cette valeur, la largeur pouvant sans difficulté être de 2,5 μ ; nous voyons qu'elle n'introduit aucune erreur de mesure et qu'il était justifié de ne pas en tenir compte.

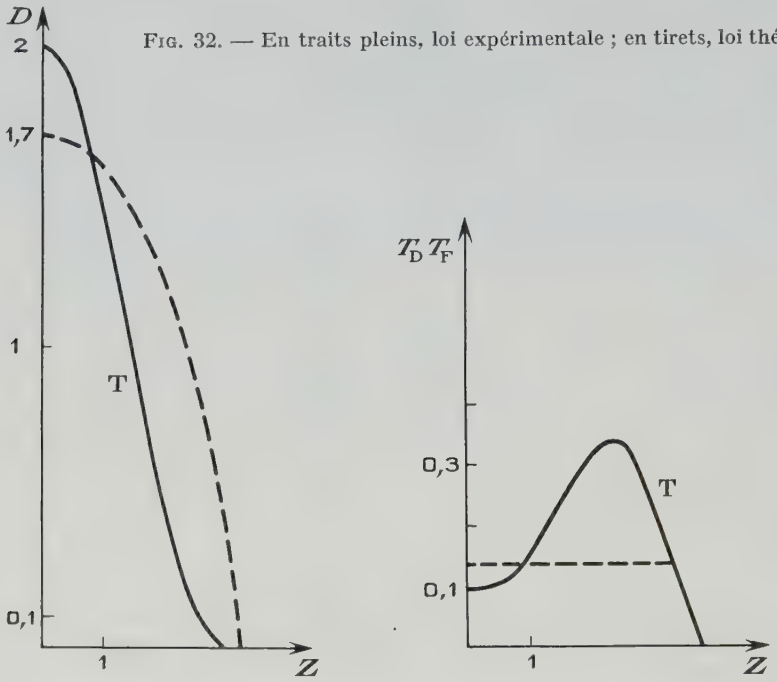


FIG. 32. — En traits pleins, loi expérimentale ; en tirets, loi théorique.

c) *Montage du filtre.* — Le filtre absorbant, film transparent, est immergé dans du phtalate de butyle entre une lame mince optiquement parfaite et la lame-support de l'anneau déphasant. Cette dernière est placée de telle façon que le centre de l'anneau déphasant coïncide rigoureusement avec celui du centre absorbant (fig. 31).

7. **Résultats. Conclusion.** — *1. Images restituées.* — Les meilleurs résultats ont été obtenus en enregistrant le défaut de mise au point sur le film plan Gevaert 5E 56 développé au D 158 à 20° pendant 4 mn avec un filtre dont la loi en densité est donnée sur la figure 32.

Sur la figure 33 (planche VIII), on peut observer :

le texte A à partir duquel on a obtenu le texte brouillé B par défaut de mise au point dans les conditions expliquées précédemment ;

le texte C restitué, obtenu après filtrage à partir de B.

La figure 34 (planche IX) montre aussi la restitution de traits brouillés, le défaut de mise au point a inversé le contraste des traits ; sur le cliché net A on compte respectivement 3 et 4 traits noirs, sur le cliché flou B, 3 et 4 traits blancs. Sur le cliché C restitué on compte à nouveau 3 et 4 traits noirs.

2. Influence du filtre absorbant dans le filtrage. — Le filtre qui donne les meilleurs résultats ne coïncide pas avec celui que nous avions calculé théoriquement (fig. 32). Aussi avons-nous étudié les images restituées données par divers filtres dont les lois en densité sont voisines de celle calculée (§ 6.*2* Bb).

Sur la figure 35, on voit que la courbe T_D T_F est loin d'être plate et présente un

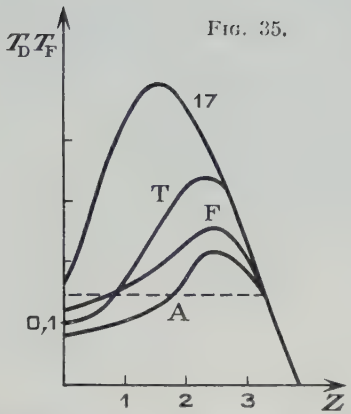


FIG. 35.

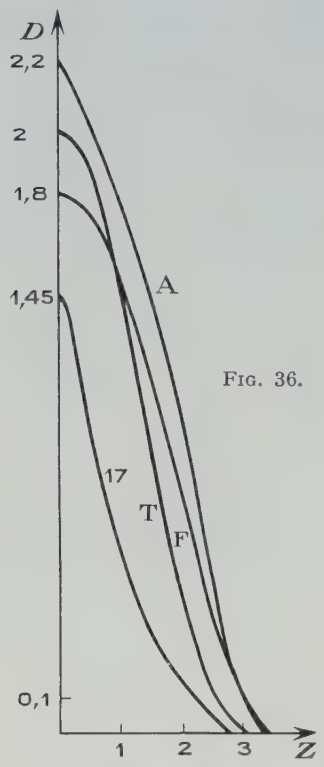


FIG. 36.

maximum accentué pour la fréquence 2,2 mm^{-1}. La densité maximum du filtre est $D = 2$ et non 1,7.

On constate que la loi $D = f(Z = k\nu)$ est beaucoup plus pointue que celle calculée ; pour $Z = 2$, soit $1/a = 1{,}8$ mm^{-1} (auquel correspond dans le plan du filtre $\rho = 0{,}33$ mm) on a respectivement $D = 0{,}5$ pour le filtre qui donne une image débrouillée et $D = 1{,}22$ pour le filtre calculé théoriquement. Seules les basses fréquences sont atténuées.

Les clichés restitués de la figure 37 (planche X) montrent bien que le débrouillage est d'autant meilleur que la courbe $D = f(k\nu)$ est plus rapidement décroissante (fig. 36).

La figure 38 (planche X) donne le dernier essai que nous avons réalisé ; le débrouillage semble encore supérieur à celui des clichés des figures 33 et 34. La figure 39 montre que la courbe $D = f(k\nu)$ de ce dernier filtre 21 est sensiblement la même que celle du filtre T, sauf au centre où la densité est encore supérieure. Le maximum de $T_D\ T_F$ est très légèrement déplacé (fig. 40).

3. Conclusion. — Le choix des émulsions, supports des images à améliorer, a une importance considérable. Une restitution optimum ne sera obtenue que si l'émulsion a été judicieusement choisie et utilisée dans certaines conditions (§ 4 et 5).

Il faut noter que les difficultés que nous avons rencontrées sont dues à l'échelle du restituteur. En effet, ses dimensions nous obligent à avoir un filtre de très petit

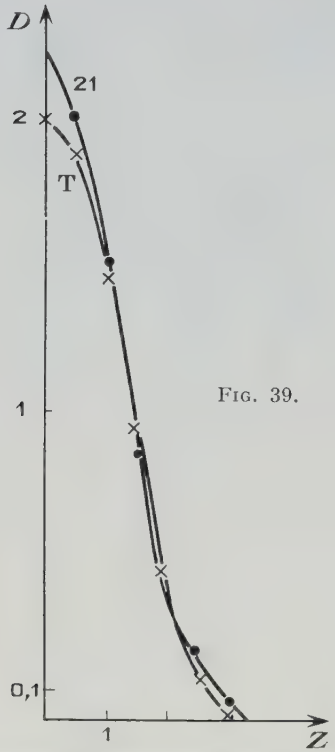


Fig. 39.

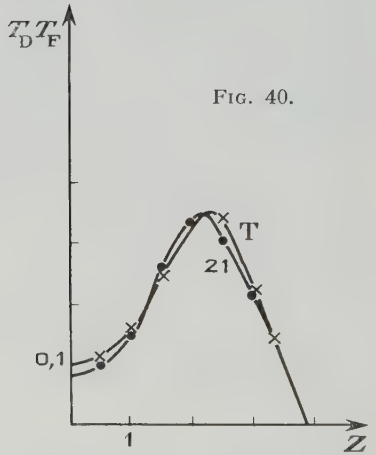


Fig. 40.

diamètre ; la densité du filtre absorbant sur un diamètre de 0,5 mm varie environ de 0 à 2 ce qui est très délicat à obtenir et à mesurer. Nous sommes pratiquement obligée pour un filtre avec une loi donnée $D = f(\nu)$ d'opérer par tâtonnements et il est difficile de faire varier cette loi dans un si petit domaine. Il serait donc beaucoup plus profitable de travailler à une échelle plus grande, ce qui entraînerait l'utilisation d'objectifs de très grande longueur focale et de grand diamètre ; il faudrait utiliser des objectifs astronomiques de très bonne qualité optique. En outre, dans ces conditions, le bruit de fond, pour les émulsions à grain pas très fin, serait moins gênant car les détails du cliché seraient beaucoup plus grands que le grain.

Dans cette étude nous nous sommes donné le défaut de mise au point, puis avons réalisé le cliché à améliorer et le filtre compensateur. Dans la pratique le problème sera différent ; il faudra améliorer un cliché donné avec un défaut de mise au point indéterminé. Il suffira alors d'essayer toute une série de filtres pour différents défauts de mise au point et de sélectionner celui qui correspond au défaut du cliché. Au préalable, le cliché devra être contretypé sur une émulsion de très bonne qualité optique en se plaçant dans le domaine de linéarité, pour obtenir le débrouillage désiré.

Mais en définitive les résultats permettent de conclure que l'on obtient un débrouillage très satisfaisant de clichés pris avec un défaut de mise au point par la méthode du filtrage des fréquences spatiales, si l'on veut bien prendre certaines précautions ; l'inversion du contraste des traits est rétablie dans le cas de la figure 35 et un texte est rendu lisible dans le cas de la figure 34.

Ces recherches ont été effectuées à l'Institut d'Optique sous la direction du Professeur A. Maréchal. Je lui adresse tous mes remerciements pour m'avoir guidée dans mon travail et m'avoir fait bénéficier de ses conseils.

Je remercie également le Professeur A. Arnulf qui a bien voulu présider le jury de cette thèse ainsi que le Professeur M. Françon qui a accepté d'être membre de ce jury.

Mes remerciements s'adressent aussi au Professeur P. Fleury, Directeur de l'Institut d'Optique, qui a bien voulu m'accueillir et me faciliter les recherches.

Enfin je remercie M^me M. Marquet, qui a mis son laboratoire à ma disposition, ainsi que tous les chercheurs de l'Institut d'Optique pour l'intérêt qu'ils ont pris à mon travail, tout particulièrement ceux du laboratoire de M^r G. Nomarski et, en premier lieu, M^r G. Nomarski lui-même.

Manuscrit reçu le 15 juillet 1964.

Références

[1] A. Maréchal & M. Françon, Traité d'optique instrumentale, éd. *Rev. Opt.*, Paris, 1960, t. **2**, Diffraction, structure des images.

[2] P. M. Duffieux, L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique, chez l'Auteur, Fac. Sc. Besançon, 1946.

[3] A. Blanc-Lapierre, Considérations sur la théorie de la transmission de l'information et sur son application à certains domaines de la physique, *Ann. Inst. H. Poincaré*, t. **13**, 1953, p. 245.

[4] A. Maréchal & P. Croce, Un filtre de fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques, *C. r. Ac. Sc.*, t. **237**, 1953, p. 607.

[5] P. Croce, Etude d'une méthode de filtrage des images optiques (Thèse), *Rev. Opt.*, t. **35**, 1956, p. 569 et 642.

[6] A. Maréchal, P. Croce & K. Dietzel, Amélioration du contraste des détails des images photographiques par filtrage des fréquences spatiales, *Acta electronica*, t. **2** et *Opt. Acta*, t. **5**, 1958, p. 256.

[7] M^me M. Marquet, Détramage de clichés par filtrage optique, *Opt. Acta*, t. **6**, 1959, p. 404.

[8] J. Tsujuchi, I. Restitution des images aberrantes par le filtrage des fréquences spatiales, II. Restitution de l'image dont le spectre comprend une partie négative, *Opt. Acta*, t. **7**, 1960, p. 243 et p. 385.

[9] P. Vernier, Sur l'action photographique des électrons, applications aux observations astronomiques, éd. Gauthier-Villars, Paris, 1958.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

« Les objectifs à focale variable. »

Vu et approuvé :

Paris, le 24 mars 1963

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY

Vu et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris

Jean ROCHE

Possompes	T	Zoologie.
Pullmann	T	Chimie quantique.
Teillac	T	Physique Nucléaire et Radioactivité.
Tonnelat	T	Biologie physico-chim.
Ville	T	Econométrie.
Willemart	T	Chimie (P. C. B.).
Dode	T	Chimie (Orsay).
Freymann	T	Recherches Physiques.
Guinochet	T	Biologie Vég. S.P.C.N. (Orsay).
Rollet	T	Chimie minérale.
Mlle Josien	T	Chimie (S.P.C.N.).
Chevalley	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
Arnoult	T	Electronique (Orsay).
Chapelle	T	Physique (Orsay).
Delange	T	Mathématiques I (Orsay).
Deny	T	Mathématiques Générales (Orsay).
Germain	T	Mécanique théorique des fluides.
Lucas G.	T	Géologie.
Allard	T	Chimie Physique.
Berthelot	T	Physique des particules Fond.
Bricart	T	Météorologie et phys. de l'Atmosphère.
Mme Albe-Fessard	T	Psychophysiologie.
Friedel	T	Physique des Solides (Orsay).
M. Julia	T	Etudes des Moléculaires naturelles complexes.
Lender	T	Biol. Animale S.P.C.N. (Orsay).
Magat	T	Physico-chimie des radio-éléments.
Mlle Quintin	T	Electrochimie.
Monod	T	Chimie du métabolisme.
Benoit	T	Physiol. Anim. (Orsay).
De Possel	T	Analyse numérique.
Charlot	T	Chimie analytique.
Lemée	T	Physiol. Vég. B. M. P. V. (Orsay).
Guérin	T	Chimie M. P. C. (Orsay).
Chatelet M.	T	Chimie (P. C. B.).
Jean	T	Phys. Nucléaire (Orsay).
Mattler	T	Physique S.P.C.N.
Bergerard	T	Zoologie (Orsay).
Bertein	T	Electronique (Orsay).
Bouissières		Chimie des Radioéléments (Orsay).
Mme Couture	T	Thermodynamique et Mécanique Physique.
Ellenberger	T	Géologie des grandes régions du globe.
Franc	T	Biol. Animale (P. C. B.).
Schnell		Botanique tropicale (Orsay).
Stolkowski	T	Physiologie végétale.
Acher		Chimie Biol. (Orsay).
Baudoin		Biologie animale P.C.B.
Beaumont		Biol. animale. S.P.C.N.
Blamont	T	Géophysique Ionosphère.
Bourreau		Botanique.
Curie D.		Physique (M. G. P.).
Durand-Delga		Géologie.
Fréon	T	Chimie organique (Orsay).
Heller	T	Physiologie végétale.
Tortrat	T	Calcul des Probabilités.
Cailleux		Géologie (S. P. C. N.).
Magnan	T	Physique (S. P. C. N.).
Daudel	T	Mécanique ondulatoire appliquée à la Chimie théorique et à la Physique nucléaire.
Mlle Fourcroy		Biol. Végétale (S.P.C.N.).
Mme Choquet-Bruhat	T	Mécan. Analytique et Mécanique céleste.
Mlle Veil		Physiologie Générale.
Lwoff	T	Microbiologie.
Siestrunck	T	Mécanique physique et expérimentale.
Lacombe	T	Métall. des métaux Nucl.
Brochard	T	Physique P.C.B. (Orsay).
Cabannes	T	Mécanique générale.
Lesieur	T	Mathématiques I (Orsay).
Mazet	T	Mécanique générale (Orsay).
Caire		Géographie physique et Géolog. dynamique.
Comolet	T	Mécanique des fluides.
Coraboeuf		Physiologie Animale (Orsay).
Delloue		Physique de l'exosphère.
Gorenflot		Botanique II (Orsay).
Houillon		Biol. animale (P.C.B.).
Jullien J.		Chimie (S.P.C.N.). (Orsay).
Malgrange	T	Technique Math. de la Physique (Orsay).
Olivier		Anthropologie.
Nozeran	T	Botanique II (Orsay).
Blanc-Lapierre	T	Physique E.N.S. (Orsay).
Chevaugeon	T	Botanique (Orsay).
Kahane	T	Mathématiques (Orsay).
Samuel	T	Mathémat. E.N.S. féminines.
Kourganoff	T	Astronomie (Orsay).
Thiry	T	Mécanique céleste.
Abeles		Physique S.P.S.C.N.
Amat		Physique P.C.B.
Auboin		Géologie
Mme Benoit-Gueutal		Physique Nucl. et radioactivité.
Bougis		Biologie marine (Villefranche/mer).
Bruhat	T	Mathématiques M.P.C.
Brunn	T	Géologie historique (Orsay).
Chabbal		Physique M.G.P. (Orsay).
Deheuvels	T	Mathématique Propé (Orsay).
D'espagnat		Physique théorique (Orsay).
Furon		Géologie S.P.C.N.
Mme Gans	T	Génétique.
Geneves		Biologie végétale P.C.B.
Guilbert		Physique (C.U.S. Orléans).
Hupe		Pétrographie.
Hollande	T	Biologie générale.
Lions	T	Analyse numérique.
Maitte		Chimie P.C.B.
Meyer		Physique propédeutique.
Nicolas		Géologie appliquée.
Panigel		Biologie générale.
Ravier		Pétrographie.
Roseau	T	Mécanique théoriq. des Fluides.
Roubine		Electronique.
Silber	T	Chimie P.C.B.
Uebersfeld	T	Electronique.
Yvon	T	Théories Physiques.

Secrétaire général ..... R. Poullain.

Imprimé en France. — Imprimerie JOUVE, 15, rue Racine, PARIS (6e). — 3-1965
N° d'édition : 60. — Dépôt légal : 1er trimestre 1965